



Funktionsentwicklung eines Nothalteassistentensystems bei kardiovaskulär bedingter Fahrunfähigkeit

Peter Mirwaldt

Berichte aus dem DLR-Institut
für Verkehrssystemtechnik

Band 26



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Funktionsentwicklung eines Nothalteassistenzsystems bei kardiovaskulär bedingter Fahrunfähigkeit

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von:	Dipl.-Ing. Peter Mirwaldt
aus (Geburtsort):	Humenné - Slowakische Republik
eingereicht am:	16. Mai 2014
mündliche Prüfung am:	29. September 2014
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder

Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik

Band 26

**Funktionsentwicklung eines Nothalteassistenzsystems bei
kardiovaskulär bedingter Fahrunfähigkeit**

Peter Mirwaldt

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
Institut für Verkehrssystemtechnik
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

ISSN 1866-721X

DLR-TS 1.26

Braunschweig, im November 2014

Institutsdirektor:
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Verfasser:
Peter Mirwaldt

Vorwort des Herausgebers

Liebe Leserinnen und Leser,

in Ihren Händen halten Sie einen Band unserer Buchreihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“. In dieser Reihe veröffentlichen wir spannende, wissenschaftliche Themen aus dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und aus seinem Umfeld. Einen Teil der Auflage stellen wir Bibliotheken und Fachbibliotheken für ihren Buchbestand zur Verfügung. Herausragende wissenschaftliche Arbeiten und Dissertationen finden hier ebenso Platz wie Projektberichte und Beiträge zu Tagungen in unserem Hause von verschiedenen Referenten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

Mit dieser Veröffentlichungsreihe verfolgen wir das Ziel, einen weiteren Zugang zu wissenschaftlichen Arbeiten und Ergebnissen zu ermöglichen. Wir nutzen die Reihe auch als praktische Nachwuchsförderung durch die Publikation der wissenschaftlichen Ergebnisse von Dissertationen unserer Mitarbeiter und auch externer Doktoranden. Veröffentlichungen sind wichtige Meilensteine auf dem akademischen Berufsweg. Mit der Reihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“ erweitern wir das Spektrum der möglichen Publikationen um einen Baustein. Darüber hinaus verstehen wir die Kommunikation unserer Forschungsthemen als Beitrag zur nationalen und internationalen Forschungslandschaft auf den Gebieten Automotive, Bahnsysteme und Verkehrsmanagement.

Medizinische Notfälle von Fahrzeugführern wurden als Ursache von Verkehrsunfällen mit teilweise verheerenden Folgen bislang unzureichend betrachtet. Nothalteassistenzsysteme zur Bewältigung dieser Notfälle befinden sich noch im Forschungsstadium, da vor allem die dafür benötigte Erkennung des Fahrerzustands sowie die Gestaltung von automatischen Fahrfunktionen noch viele ungeklärte Fragen aufwerfen. Der vorliegende Band stellt einen Ansatz vor, in dem systematisch Anforderungen an die Umsetzung eines Nothalteassistenzsystems abgeleitet und Konzepte für deren Umsetzbarkeit evaluiert werden. Anhand einer rechtlichen Betrachtung werden belastbare Randbedingungen für die Funktionsauslegung des Systems abgeleitet, bevor deren Umsetzbarkeit mit einer seriennahen Systemarchitektur sowie geeigneten Komponenten aufgezeigt wird. Außerdem werden erstmals relevante medizinische Notfälle identifiziert und Möglichkeiten zu ihrer Detektion diskutiert. Als relevante Faktoren werden dabei kardiovaskuläre Ursachen identifiziert. In einer Probandenstudie werden zwei Sensorkonzepte zur kontaktlosen Messung der Herzrate evaluiert und somit die Grundlage für eine zukünftige automatische Erkennung von kardiovaskulären Notfällen im Fahrzeug geschaffen. Mit der Beantwortung einiger zentraler Forschungsfragen leistet diese Arbeit einen wichtigen Beitrag auf dem Weg zur Einführung von Nothalteassistenzsystemen - und damit für mehr Sicherheit im Verkehr von morgen.

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Vorwort des Autors

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Forschungsabteilung „Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit“ der Volkswagen AG.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer, Leiter des Instituts für Verkehrssystemtechnik des DLR Braunschweig, für die Betreuung dieser Arbeit. Im Rahmen der zahlreichen Rücksprachen, auch über wissenschaftliche Inhalte hinaus, haben viele Anregungen wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit sowie zu meiner persönlichen Weiterentwicklung beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder und Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay danke ich für die Übernahme des Koreferates und des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Meinen Forscherkollegen der Volkswagen AG danke ich für das freundschaftliche und kreative Arbeitsumfeld. Meinem Betreuer Dr.-Ing. Arne Bartels danke ich insbesondere für das mir entgegengebrachte Vertrauen. Er hat mich gelehrt, stets das Wesentliche im Auge zu behalten. Darüber hinaus haben mich viele Kollegen bei der Umsetzung meines Forschungsprojekts unterstützt. Hierfür möchte ich mich speziell bei Dr.-Ing. Simon Karrenberg, Dr.-Ing. Thanh-Binh To und Wolfgang Grundler bedanken.

Den Mitarbeitern des Institutes für Biomedizinische Technik der Technischen Universität Dresden danke ich für die Unterstützung bei der Bewältigung biomedizinischer Herausforderungen im Rahmen dieser Arbeit. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Sebastian Zaunseder bedanken, der mir den Zugang zur Biomedizintechnik erleichtert hat und mir stets unterstützend zur Seite stand.

Der erfolgreiche Abschluss dieser Arbeit wäre ohne die aufopferungsvolle Mithilfe der Studenten, die mich im Rahmen ihres Praktikums oder ihrer Abschlussarbeit unterstützt haben, nicht möglich gewesen. Insbesondere möchte ich mich bei Max Braer und Patrick Pascheka herzlich für ihre Unterstützung bedanken.

Meine Familie und Freunde hatten stets viel Verständnis für dieses zeitintensive Vorhaben und gaben mir Kraft, auch in schwierigen Zeiten nicht den Mut und das Vertrauen in das Gelingen dieser Arbeit zu verlieren. Hierfür möchte ich mich besonders bei meiner Mutter Maria Mirwaldt, meinem Bruder Thomas Mirwaldt und Frank Harchut bedanken.

Braunschweig, im Oktober 2014

Peter Mirwaldt

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
Kurzfassung	xv
Abstract	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Anforderungen an die Gestaltung eines Nothalteassistenzsystems	7
2.1 Rechtliche Betrachtung	9
2.2 Normen und Verordnungen	12
2.2.1 Code of Practice	13
2.2.2 Gefahren- und Risikoanalyse nach ISO 26262	16
2.3 Zusammenfassung der Anforderungen und Abgrenzung der Arbeit	18
3 Konzept der Systemarchitektur eines Nothalteassistenzsystems und Beispielausprägungen	21
3.1 Maßnahmen zur Senkung der Betriebsgefahr durch das Nothalteassistenzsystem	21
3.2 Definition von Funktionsumfängen anhand der technische Umsetzbarkeit der Maßnahmen	24
3.3 Systemarchitektur einer automatischen Fahrfunktion	27
3.4 Anpassung der Systemkomponenten für ein NHA und Beispielausprägungen	28
3.4.1 Bedienelement zur Aktivierung des NHA	29
3.4.2 Umfeldwahrnehmung	30
3.4.3 Planer und Entscheider	37
3.4.4 Ausgabeschnittstellen zur Information des Fahrers (HMI)	45
3.5 Zusammenfassung	47
4 Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug	51
4.1 Medizinische Notfälle im Fahrzeug	52
4.2 Grundlagen zur Erkennung von kardiovaskulären Notfällen	55
4.2.1 Das Herz-Kreislauf-System	55
4.2.2 Kardiovaskuläre Notfälle und deren Detektierbarkeit	57
4.3 Stand der Technik zur kontaktlosen Messung von EKG-Daten im Fahrzeug	62
4.4 Probandenstudie zur Evaluation zweier kontaktloser Verfahren	66
4.4.1 Sensoren und Algorithmen	67
4.4.2 Identifikation von Störgrößen	69
4.4.3 Versuchsplan und Probandenkollektiv	71

4.4.4 Ergebnisse und Diskussion	73
4.5 Zusammenfassung	79
5 Warnstrategien für ein kooperatives Fahrstreifenwechselmanöver	83
5.1 Grundlagen	83
5.1.1 Kooperativer Fahrstreifenwechsel	83
5.1.2 Situationserkennung im Straßenverkehr	85
5.1.3 SEEV-Modell für Aufmerksamkeitszuwendungen	87
5.2 Warnstrategien	87
5.2.1 Stand der Technik zu Untersuchungen von kooperativem Verhalten in Verkehrssituationen	88
5.2.2 Konzept der Warnstrategien	89
5.3 Probandenstudie zur Untersuchung von Warnstrategien	94
5.3.1 Anforderungen an die Gestaltung der Probandenstudie	94
5.3.2 Versuchsszenario	95
5.3.3 Fahrsimulator und Messtechnik	97
5.3.4 Versuchsplan und Probandenkollektiv	98
5.3.5 Ergebnisse und Diskussion	99
5.4 Zusammenfassung	105
6 Zusammenfassung und Ausblick	107
A Anhang	113
A.1 Systemarchitektur für ein Nothalteassistenzsystem	113
A.2 Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug	114
A.3 Warnstrategien für ein kooperatives Fahrstreifenwechselmanöver	117
B Abkürzungsverzeichnis	119
C Symbolverzeichnis	123
D Literaturverzeichnis	127

Abbildungsverzeichnis

1-1	Unfallursachenverteilung bei Verkehrsunfällen mit Todesfolge in Deutschland	2
1-2	Aufbau der Arbeit	5
2-1	Rechtliche Grundlagen mit Bezug zu Nothalteassistenzsystemen	8
2-2	Sicherheitslebenszyklus nach ISO 26262	17
3-1	Einteilung der Funktion hinsichtlich Umfang und Wirkungsbereich	26
3-2	Systemarchitektur einer automatischen Fahrfunktion	27
3-3	Konzept des Bedienelements zur Aktivierung des NHA	30
3-4	Sensorkonzepte für Funktionsumfang A	34
3-5	Sensorkonzepte für Funktionsumfang B	35
3-6	Sensorkonzepte für Funktionsumfang C	36
3-7	Seriennahe Sensorkonfiguration für ein Nothalteassistenzsystem	37
3-8	Zustandsmaschine des Nothalteassistenzsystems	38
3-9	Trajektoriangenerierung in den Frenet-Koordinaten einer Referenzkurve	41
3-10	Anfahrtspunkte und Trajektorienbündel der Bahnplanung	43
4-1	Top-Down-Ansatz zur Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug	51
4-2	Todesursachen in Deutschland	55
4-3	Verlauf der Aktionspotenziale im Herzen und das daraus entstehende Potential im Standard-EKG	56
4-4	Schematischer EKG-Verlauf eines gesunden Menschen und dazugehörige Wertebereiche	57
4-5	EKG-Verlauf beim Herzinfarkt (Myokardischämie)	59
4-6	EKG-Verlauf bei Herzrhythmusstörungen (Ventrikuläre Extrasystolen)	60
4-7	Grundlage zur Berechnung der HRV sind die RR-Intervalle	60
4-8	Verlauf der RR-Intervalle sowie die Leistung HF im Bereich von 0,125-0,5 Hz während einer Ischämie	61
4-9	Messaufbau („Sitzkiste“) für die Probandenstudie	66
4-10	Messaufbau des kapazitiven EKG	67
4-11	Extinktionskoeffizient des vom Gesichtsfeld reflektierten Lichts	68
4-12	Verarbeitungskette der kamerabasierten Plethysmographie	68
4-13	Applikationsort der Klebeelektroden des Referenz-EKG	69
4-14	Vergleich der Fehlannotationsraten FAR_{cEKG} des kapazitiven EKG zwischen der Einkanal- und Mehrkanaldetektion in allen drei Phasen ohne Lichtartefakte	74
4-15	Mittlere Differenz aus cEKG- und Referenz-Herzrate $HR_{diff,cEKG,i}$ für drei Phasen ohne Lichtartefakte	75
4-16	Mittlere Differenz aus Kamera- und Referenz-Herzrate $HR_{diff,cam,i}$ für vier Messabschnitte	77
4-17	Verlauf der kamerabasierten Herzrate ($HR_{mean,cam,21}$) und der Referenzherzrate ($HR_{mean,ref,21}$) für den Probanden 21 in Phase 2 („Ruhephase + Lichtartefakte“)	78

5-1	Versuchsszenario nach Schwarz und Decke zur Untersuchung von Warnstrategien für ein kooperatives Fahrstreifenwechselmanöver	84
5-2	Informationsverarbeitungsprozess nach Endsley [38]	85
5-3	Modell zur Verkehrskognition nach Barthelmess et al. [10]	86
5-4	Bewertung von Lichtfunktionen anhand ihrer Auffälligkeit und Verständlichkeit	91
5-5	Bewertung von Fahrmanövern anhand ihrer Auffälligkeit und Verständlichkeit .	92
5-6	Im Rahmen der Probandenstudie untersuchte Warnstrategien für ein kooperatives Fahrstreifenwechselmanöver [81]	93
5-7	Versuchsszenario aus Sicht des Probandenfahrzeugs [81]	95
5-8	Ablauf der Phasen im Versuchsszenario [81]	96
5-9	HMI-Simulator der Volkswagen AG Konzernforschung	97
5-10	Messverfahren zur Datenerhebung während der Simulatorstudie	97
5-11	Ablauf der Probandenstudie [81]	98
5-12	Blickbewegungsdaten in der Warnphase (links: kumulierte Blickzuwendungsdauer zum Notfallfahrzeug, rechts: Blickzuwendungsfrequenz zum Notfallfahrzeug)	100
5-13	Abstandsverhalten des Probandenfahrzeugs zum Notfallfahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug während der Warnphase	101
5-14	Maximale Bremspedalstellung im Probandenfahrzeug während der Warn- und Fahrstreifenwechselphase [81]	102
5-15	Begründungen für das Fahrverhalten der Probanden während der Notsituation (nach der Erstreaktion) [81]	103
5-16	Subjektiv empfundene Gefährdung während der Erstreaktion [81]	103
5-17	Bewertung einzelner Warnelemente für die Durchführung eines kooperativen Nothaltemanövers [81]	104

Tabellenverzeichnis

2-1	Normen für Fahrerassistenzsysteme	8
2-2	Auszug aus dem Code of Practice (CoP) mit Hinblick auf den aktuellen Stand zu Nothalteassistenzsystemen nach Gasser et al. [43] und daraus ableitbaren Fragestellungen zur Systemauslegung	15
2-3	Auszug aus dem Code of Practice (CoP) mit Hinblick auf den aktuellen Stand zu Nothalteassistenzsystemen und daraus ableitbaren Fragestellungen zur Kontrollierbarkeit	16
2-4	Zusammenfassung der Anforderungen an die Gestaltung eines Nothalteassistenzsystems sowie mögliche Fragestellungen	19
3-1	Anforderungen an die Umfeldsensoren für drei Funktionsumfänge des NHA . . .	31
3-2	Vergleich seriennaher Sensortechnologien für NHA	33
3-3	HMI-Ausgaben des Nothalteassistenzsystems	46
4-1	Auszug aus der Fahrerlaubnis-Verordnung (Anlage 4 zu §§ 11, 13 und § 14 FeV - Eignung und bedingte Eignung zum Führen von Kraftfahrzeugen)	53
4-2	Todesursachen bei 34 Verkehrsunfällen, hervorgerufen durch medizinische Notfälle beim Fahrer	53
4-3	Bewertung kontaktloser und minimal kontaktgebundener Messverfahren zur Erfassung der Herzrate im Fahrzeug	65
4-4	Störgrößen bei kontaktloser und kamerabasierter Herzratenmessung im Fahrzeug	70
4-5	Ablauf der Probandenstudie	71
4-6	Durchschnittliche Verbesserung der Herzschlagerkennung durch die Mehrkanaldetektion im Vergleich zur Einkanaldetektion	75
4-7	Ergebnis der Probandenstudie: Mittlerer Fehler zwischen den zu evaluierenden Sensoren und dem Referenz-EKG für alle Phasen über alle 27 Probanden	78
A-1	Zeitpunkte und Art der eingeleiteten Lichtartefakte während der Probandenstudie	114
A-2	Zeitpunkte und Art der in die Sitzkiste eingeleiteten Impulse während der Probandenstudie (Phase „Passive Bewegungen“)	114
A-3	Ablauf der Fahrmanöver während der Phase „Aktive Bewegung“	115
A-4	Probandeneigenschaften der 27 Probanden	116
A-5	Phasenlängen der Warnstrategien innerhalb der Probandenstudie	117

Kurzfassung

Verkehrsunfälle, die sich aufgrund von medizinischen Notfällen des Fahrzeugführers ereignen, werden bedingt durch den demografischen Wandel der Gesellschaft zukünftig einen wachsenden Anteil am Gesamtunfallgeschehen haben. Nothalteassistenzsysteme verfolgen das Ziel, diese Notfälle zu detektieren und das Fahrzeug durch ein vollautomatisches Fahrmanöver in den Stillstand zu überführen. Eine juristische Erstbetrachtung dieser Systeme hat ergeben, dass sie grundsätzlich zulassungsfähig sind, wenn sie risikomindernd ausgelegt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird erstmals eine Systematik zur Gestaltung von Nothalteassistenzsystemen anhand ihrer rechtlichen Einordnung erstellt und die Umsetzbarkeit mit seriennaher Technik aufgezeigt. Hierfür werden unter anderem die Komponenten zur Umfeldwahrnehmung, Situationsentscheidung sowie zur Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle betrachtet.

Weiterhin werden für die Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug kardiovaskuläre Ursachen als relevant identifiziert. Die kontaktlose Messung der mittleren Herzrate bietet die Grundlage zur Erkennung dieser Notfälle. Die prinzipielle Messbarkeit der Herzrate im Fahrzeug wird anhand eines kapazitiven und eines kamerabasierten Verfahrens erstmals im Rahmen einer Probandenstudie bestätigt. Verbesserungspotentiale ergeben sich bezüglich der Kompensation von Störeinflüssen, wie z. B. von Körperbewegungen.

Zur besseren Durchführbarkeit von automatischen Fahrmanövern wird eine Warnstrategie entwickelt, die andere Verkehrsteilnehmer zu einer „kooperativen“ Abstandsvergrößerung zum Notfallfahrzeug motivieren soll. Im Rahmen einer Probandenstudie im Fahrsimulator wird bestätigt, dass Verkehrsteilnehmer zu einem solchen kooperativen Verhalten motiviert werden können. Die besten Ergebnisse werden mit einer Variante erzielt, bei der abwechselnd das Warnblinklicht und der Fahrtrichtungsanzeiger angesteuert werden, in Kombination mit einem Spurversatz in Richtung der rechten Fahrbahnmarkierung.

Abstract

An ageing population combined with an increase in the age at which people continue to drive is likely to result in accidents caused by medical emergencies representing an increasing proportion of total road accidents. Emergency stop assistant systems aim to detect these emergencies and bring the car to a safe stop, using a fully automated driving function. An investigation revealed that these systems can be legally deployed provided that a risk-mitigating function layout is implemented.

For the first time, this work shows the implementation of a risk-mitigating function layout for an emergency stop assistance system according to its legal classification using close-to-production technology. Component layouts for environment perception, state machine and human machine interface are considered among others.

Regarding the detection of medical emergencies in the vehicle, cardiovascular causes are identified as most relevant. The measurement of mean heart rate with contactless sensors is the basis for detecting these emergencies. For the first time, measurability of mean heart rate with a capacitive and camera based method is demonstrated by a study with test persons using a specially designed test bench. Opportunities for improvement are revealed, especially regarding compensation of disturbing influences like the driver's body movements.

In order to provide safer automated driving maneuvers in dense traffic, warning strategies are investigated to motivate surrounding drivers to increase safe clearance to the vehicle undergoing the automated manoeuvre activated in response to a medical emergency with the driver. The ability to motivate surrounding drivers to act cooperatively is confirmed by a study in a driving simulator. Best results are achieved by a variant applying hazard warning lights and right indicator alternately in combination with a track offset towards the right lane marking.

1 Einleitung

1.1 Motivation

„...Ein 90-jähriger Mann hat am Mittwoch auf Fehmarn am Steuer einen Herzinfarkt erlitten und hat mit seinem Wagen dabei einen 16 Jahre alten Fußgänger angefahren. Der Fahrer starb noch an der Unfallstelle. Der 16-Jährige wurde erheblich verletzt...“

Kölner Stadt-Anzeiger, vom 30.01.2013

Beinahe wöchentlich erscheinen neue Meldungen zu Verkehrsunfällen, die aufgrund von medizinischen Notfällen der Fahrzeugführer entstehen. Die ab dem Zeitpunkt des Notfalls führerlos fahrenden Fahrzeuge stellen eine akute Gefahrenquelle für die Insassen des Fahrzeugs sowie für andere Verkehrsteilnehmer dar.

Fahrerassistenzsysteme werden primär mit dem Ziel entwickelt, den Fahrer in sicherheitsrelevanten Situation zu unterstützen und die Fahrzeugführung komfortabler zu gestalten [136]. Aus Unfallstatistiken der GIDAS-Datenbank¹ (German In-Depth Accident Study) geht hervor, dass 94 % der tödlichen Verkehrsunfälle auf eine falsche Einschätzung der Verkehrslage durch die Fahrzeugführer oder durch unerwartete Ereignisse im Verkehr zurückzuführen sind (vgl. Abb. 1-1). Derzeitige Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer primär bei der Bewältigung seiner Fahraufgaben in diesen Situationen, unterteilt in Aufgaben der Navigation (Navigationssysteme), Bahnführung (z. B. Frontalkollisionsschutzsysteme, Lane Departure Warning) und der Fahrzeugstabilisierung (z. B. Antiblockiersystem ABS, Electronic Stability Control ESC). Im Gegensatz dazu beschränken sich Seriensysteme zur Überwachung von mentalen Faktoren derzeit auf die Aufmerksamkeitsüberwachung [94] sowie eine Pausenempfehlungen bei Müdigkeit [96][93].

Bislang von serienmäßigen Fahrerassistenzsystemen nicht adressiert werden medizinisch bedingte Notfälle, die den Fahrer zum Zeitpunkt des Eintretens fahrunfähig² werden lassen. Anhand von GIDAS-Unfallzahlen kann abgeschätzt werden, dass mindestens 4 % der Unfälle mit

¹Erhebungsgebiete der GIDAS-Daten: Hannover und Dresden (Radius: 50 km).

²In der Literatur werden die Begriffe Fahrunfähigkeit und Fahruntüchtigkeit synonym verwendet.

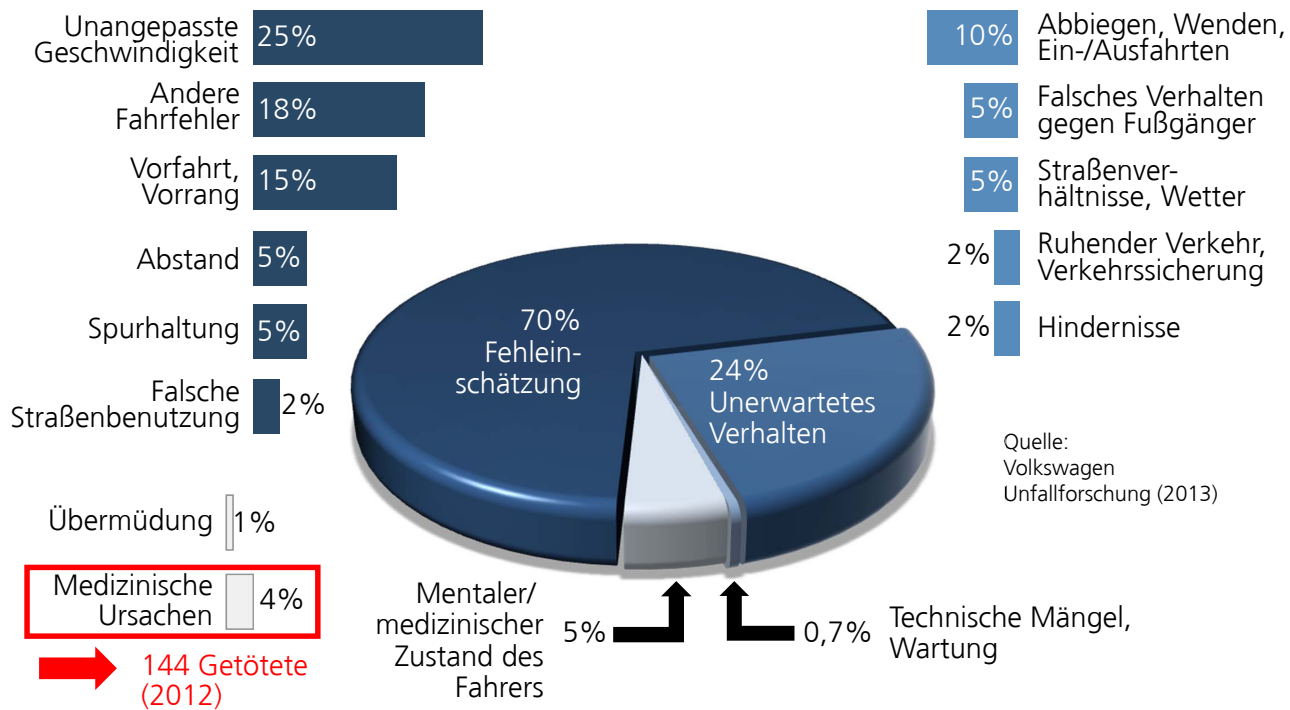


Abbildung 1-1: Unfallursachenverteilung bei Verkehrsunfällen mit Todesfolge in Deutschland (aus [80])

Todesfolge auf medizinische Ursachen zurückzuführen sind.³ Bezogen auf das Jahr 2012 entspricht dies einer Gesamtzahl von 144 Getöteten. Quellen zu weiteren Studien bestätigen diesen Anteil am Gesamtunfallgeschehen (z. B. [104][51]). Unabhängig von den Werten sprechen Indikatoren dafür, dass diese Gruppe einen größeren Anteil am Gesamtunfallgeschehen ausmacht und in Zukunft weiter ansteigen wird (in Anlehnung an [80]):

- Obduktionen nach Verkehrsunfällen sind in Deutschland selten. Sie werden gemäß § 87 der Strafprozessordnung (StPO) nur dann angeordnet, wenn der Unfallhergang und somit die Todesursache nicht rekonstruierbar sind [50]. Somit ist von einer erheblichen Dunkelziffer der durch medizinische Fahruntfähigkeit hervorgerufenen Unfälle auszugehen.
- Der demographische Wandel der Gesellschaft führt dazu, dass der Anteil älterer Menschen im Straßenverkehr und somit die Wahrscheinlichkeit von medizinisch bedingten Notfällen am Steuer stetig zunimmt. Das Statistische Bundesamt prognostiziert, dass im Jahr 2050 über 30 % der deutschen Bevölkerung älter als 65 Jahre alt sein werden. Im Jahr 2013 waren es 20,9 % [127][106].
- Die medizinische Versorgung wird stetig besser, was bspw. anhand der exponentiell steigenden Anzahl an neu implantierten Defibrillatoren ersichtlich wird [61]. In Deutschland wird Privatpersonen empfohlen, nach der Implantation für drei bis sechs Monate nicht am Straßenverkehr teilzunehmen [66]. Danach ist die Führung von Fahrzeugen wieder uneingeschränkt möglich. Trotzdem sind diese Menschen einem erhöhten medizinischen Risiko ausgesetzt, was im Falle einer Aktivierung des Defibrillators (z. B. nach einem plötzlichen

³Betrachtet wurden alle Unfälle mit mindestens einem getöteten Unfallbeteiligten, bei denen eine medizinisch bedingte Fahruntfähigkeit als einzige Unfallursache vermerkt wurde.

Herzstillstand) voraussichtlich zu einer kurzzeitigen Fahrunfähigkeit des Trägers führen wird.

- Die steigende Ausstattungsrate von Fahrerassistenzsystemen zur Vermeidung der restlichen Unfallursachen (Fehleinschätzung und unerwartetes Verhalten) in Abb. 1-1 wird zukünftig die Unfallzahlen positiv beeinflussen, nicht zuletzt durch die 2015 in Kraft tretende obligatorische Ausrüstung von neuzugelassenen LKW mit Notbrems- und Spurhalteassistenzsystemen [29]. Somit werden Verkehrsunfälle durch medizinische Ursachen einen größeren Anteil am Gesamtunfallgeschehen ausmachen.

Nothalteassistenzsysteme (NHA) sind Bestandteil der aktuellen Forschung zu Fahrerassistenzsystemen und verfolgen das Ziel, eine medizinisch bedingte Fahrunfähigkeit im Fahrzeug zu erkennen, um es anschließend durch ein automatisches Fahrmanöver kontrolliert in einen risikominimalen Zustand zu überführen. Die Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet beschäftigen sich derzeit sowohl mit der sensorischen Erkennung von Vitaldaten (z. B. [20][6]) als auch mit der Umsetzung von automatischen Fahrfunktionen (z. B. [135][7]), die im Notfall das Fahrzeug in den Stillstand manövrieren.

Eine juristische Betrachtung von NHA hat ergeben, dass sie eine Schlüsselrolle auf dem Weg zur Einführung von hoch- und vollautomatischen⁴ Fahrfunktionen einnehmen, da sie im Gegensatz zu komfortsteigernden Fahrfunktionen sowohl zulassungs- als auch haftungsrechtlich unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen grundsätzlich realisierbar sind. Die Voraussetzung dafür ist eine risikominimale Auslegung des Systems mit Systemgrenzen, die dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen [43].

Bislang nicht betrachtet wurde, welche Anforderungen sich an die technische Gestaltung eines NHA unter Berücksichtigung dieser rechtlichen Rahmenbedingungen ableiten lassen. In diesem Zusammenhang gilt es zu klären, was eine risikominimale Auslegung im Falle eines NHA bedeutet und welche Systemgrenzen sich zum aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik definieren lassen. Bei automatischen Fahrfunktionen werden die Systemgrenzen hauptsächlich durch die Möglichkeiten zur Umfeldwahrnehmung eingegrenzt, was wiederum direkte Auswirkungen auf die Durchführbarkeit bestimmter Fahrmanöver hat. Weitere Fragestellungen ergeben sich hinsichtlich der Beherrschbarkeit des Systems bei Fehlauflösungen sowie einer Absicherung gegenüber dem nicht bestimmungsgemäßen Gebrauch. Ebenfalls ist zum aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht hinreichend geklärt, welche medizinischen Notfälle sich im Fahrzeug ereignen können und anhand welcher Messgrößen bzw. mit welchen Sensoren sie detektierbar sind.

⁴Im Folgenden werden die Begriffe „**hoch- und vollautomatisch**“ nach der Definition von Gasser et al. verwendet [43]. Diese beiden Automatisierungsgrade zeichnen sich gegenüber niedrigeren Automatisierungsgraden dadurch aus, dass der Fahrer für bestimmte Zeitabschnitte (hochautomatisch) oder dauerhaft (vollautomatisch) das Geschehen nicht überwachen muss.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die wissenschaftliche Fragestellung nach einer risikominimalen Gestaltung von Nothalteassistenzsystemen bei medizinisch bedingter Fahrunfähigkeit⁵ zu beantworten. Hierfür soll aufbauend auf der rechtlichen Einordnung dieser Systeme deren praktische Umsetzbarkeit im Fahrzeug inkl. der Erkennung von medizinischen Notfällen aufgezeigt werden.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung gilt es zunächst, Anforderungen an die Gestaltung eines solchen Systems zu bestimmen. Diesbezüglich werden rechtliche Rahmenbedingungen zur Gestaltung von NHA und weiteren automatischen Fahrfunktionen sowie Vorschriften zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen betrachtet.

Anhand dieser Anforderungen soll gezeigt werden, wie eine prototypische Implementierung eines Systems zur Durchführung eines automatischen Nothaltemanövers umgesetzt werden kann.

Für die Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug gilt es forschungsseitig zu analysieren, welche Notfälle sich beim Führen eines Fahrzeugs ereignen können und mit welchen Sensoren diese Notfälle nicht-invasiv und minimal kontaktgebunden im Fahrzeug detektierbar sind.

Da ein NHA im Vergleich zu manuell gefahrenen Fahrmanövern voraussichtlich größere Abstände zu anderen Verkehrsteilnehmern benötigt, sollen abschließend Warnmöglichkeiten für nachfolgende Verkehrsteilnehmer untersucht werden. Die daraus resultierende Forschungsfrage ist, ob umliegende Verkehrsteilnehmer zu einem kooperativen⁶ Verhalten motiviert werden können, um eine Vergrößerung des Abstands zwischen den Fahrzeugen zu erzielen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der folgenden Arbeit ist in Abb. 1-2 dargestellt. Zur Betrachtung des zuvor beschriebenen Forschungsaspektes werden in Kap. 2 zunächst Anforderungen an die Gestaltung eines NHA anhand von kraftfahrzeugtechnischen Vorschriften und Gesetzen abgeleitet. Das Ergebnis dieses Kapitels ist eine Anforderungsliste, ergänzt durch mögliche Forschungsfragen, die sich aus der Betrachtung der Randbedingungen eines NHA ergeben.

⁵Im Folgenden wird mit der Bezeichnung „**medizinisch bedingte Fahrunfähigkeit**“ eine plötzliche oder graduell eintretende medizinisch bedingte Verschlechterung des Gesundheitszustandes des Fahrers beschrieben, die die Fähigkeiten zur Fahrzeugführung einschränkt und ggf. zu einem totalen Kontrollverlust des Fahrzeuges führt. Eine durch Drogen- und Alkoholkonsum sowie Müdigkeit verursachte Fahrunfähigkeit steht nicht im Fokus der weiteren Betrachtungen.

⁶Im Folgenden wird „**kooperatives Verhalten**“ als Sammelbegriff für Situationen verwendet, in denen der Fahrer bewusst auf das eigene Recht im Straßenverkehr verzichtet, um dem Mobilitätswunsch anderer den Vorrang zu geben (Partnerschaftliches Verhalten) oder die Effizienz des Verkehrssystems zu steigern (Professionelles Verhalten) (nach [13]).

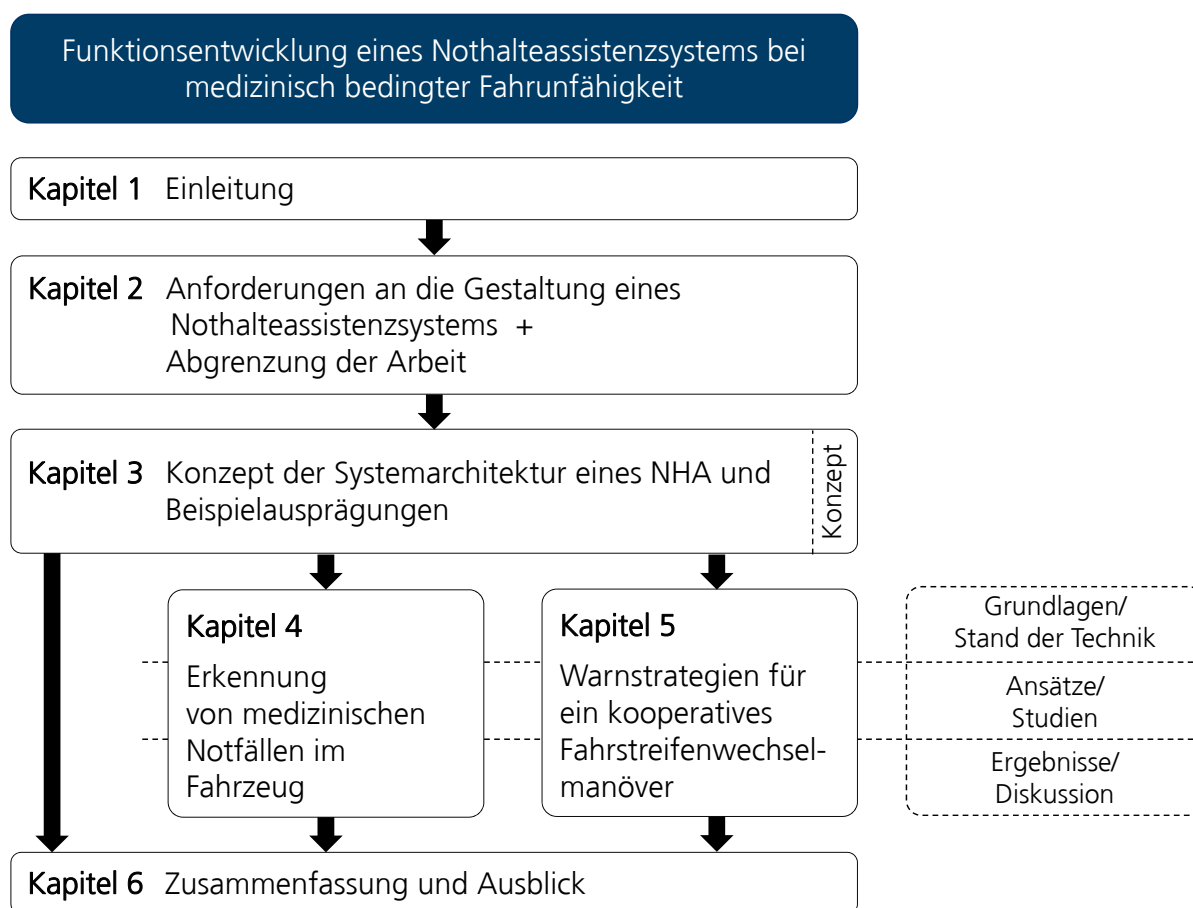


Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit

Aufbauend auf diesen Anforderungen wird in Kap. 3 ein Konzept für die Systemarchitektur eines NHA inkl. möglicher Beispielausprägungen erstellt. Es wird der Ansatz verfolgt, die automatische Fahrfunktion gemäß einer risikominimalen Auslegung zu gestalten. Daraus werden mögliche Funktionsumfänge und damit einhergehende Systemgrenzen definiert. Basierend auf bestehenden Architekturen von automatischen Fahrfunktionen werden die Systemkomponenten betrachtet, die zur Realisierung des NHA zu modifizieren sind. Ein Grundverständnis für automatische Fahrfunktionen und die dafür benötigten Komponenten wird hierfür vorausgesetzt. Es werden insbesondere die Komponenten zur Umfeldwahrnehmung, Situationsinterpretation sowie die Schnittstellen zum Fahrer vertieft.

Die Inhalte der Kap. 4 und 5 lassen sich eigenständig von den vorherigen Kapiteln betrachten. Zum Verständnis benötigte Grundlagen werden zu Beginn eingeleitet und im Anschluss daran Lösungsansätze sowie Ergebnisse vorgestellt.

In Kap. 4 werden Forschungsaspekte zur automatischen Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug aufgegriffen. Anhand eines deduktiven Ansatzes wird analysiert, welche medizinischen Notfälle sich im Fahrzeug voraussichtlich ereignen können und wie diese Notfälle mithilfe von nicht-invasiven oder minimal kontaktgebundenen Sensoren detektiert werden können. Zur Erörterung des Wirkfelds wird anhand von Studien zu Verkehrsunfällen und klinischen Daten untersucht, welche Notfälle beim Führen eines Fahrzeugs mit welcher Häufigkeit

auftreten. Im Anschluss daran werden für die am häufigsten auftretenden Notfälle mögliche Biosignale zu deren Detektion erörtert. Darauf aufbauend erfolgt eine Evaluation der für den Fahrzeugeinsatz denkbaren Sensoren zur Messung dieser Biosignale. Im Rahmen einer Probandenstudie werden ausgewählte Sensoren in einem Laboraufbau auf Stärken und Schwächen untersucht.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage nach möglichen Warnstrategien für nachfolgende Verkehrsteilnehmer werden in Kap. 5 Warnelemente untersucht, die die Verkehrsteilnehmer zu einem kooperativen Verhalten motivieren können. Hierfür werden Lichtfunktionen und Fahrmanöver anhand ihres Informationsgehalts bewertet und zu insgesamt vier Warnfunktionen kombiniert. Diese Warnfunktionen werden im Anschluss im Rahmen einer Probandenstudie in einem Fahrsimulator evaluiert.

Abschließend werden die Einzelergebnisse der Fachkapitel in Kap. 6 zusammengefasst und Anschlusspunkte für zukünftige Folgearbeiten aufgezeigt.

2 Anforderungen an die Gestaltung eines Nothalteassistenzsystems

Ziel eines NHA ist es, medizinische Notfälle im Fahrzeug zu erkennen und mittels einer automatischen Fahrfunktion eine unkontrollierte Weiterfahrt des Fahrzeugs zu vermeiden. Dies ist zugleich die Hauptanforderung an das System.

Nach [45] ergeben sich weitere Anforderungen zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen, die zur Beantwortung der wissenschaftlichen Fragestellung nach einer risikominimalen Auslegung von NHA beitragen können. Diese Anforderungen lassen sich unter anderem aus Typzulassungsbestimmungen, Verbraucherorganisationen und herstellerinternen Anforderungen ableiten. Da das menschliche Handeln im Straßenverkehr durch verschiedene Rechtsnormen geregelt wird, ergeben sich aus juristischer Sicht zusätzliche Anforderungen an die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Diese Systeme entwickeln sich derzeit in Richtung automatischer Fahrfunktionen, bei denen sich auch die Hauptaufgaben des Fahrzeugführers verändern, weshalb diese Systeme derzeit verstärkt einer rechtlichen Betrachtung unterzogen werden [43].

Bei juristischen Betrachtungen hinsichtlich der Einführung von Fahrerassistenzsystemen wird primär auf Aspekte des Straßenverkehrs- und Produkthaftungsrechts eingegangen. Bestandteil des Straßenverkehrsrechts ist unter anderem das Straßenverkehrsgesetz (StVG), in dem die Haftung von Fahrer und Halter im Schadensfall beschrieben werden.¹ Hierbei ergeben sich stets auch versicherungsrechtliche Aspekte, die im Versicherungsvertragsgesetz (VVG) beschrieben werden. Das StVG verweist des Weiteren auf die Straßenverkehrs-Ordnung (StVO), die die öffentlich-rechtlichen Verhaltensvorschriften der Teilnehmer im Straßenverkehr festlegt. Darüber hinaus finden auch die Regelungen des Produkthaftungsrechts Anwendung, wenn sich Schäden während des Gebrauchs von Fahrerassistenzsystemen ereignen, die auf die Fehlerhaftigkeit des Systems selbst zurückzuführen sind. Des Weiteren wird in der Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FZV) gefordert, dass neue Systeme gemäß einer Typengenehmigung zum Betrieb im Straßenverkehr zugelassen sind. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von Normen und Standards, die zwar nicht die rechtliche Gültigkeit eines Gesetzestextes oder einer Verordnung besitzen, wohl aber bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik zu berücksichtigen sind. In Tab. 2-1 sind einige Normen für existierende Systeme aufgelistet. Für neue Assistenzsysteme werden diese Richtlinien meist erst nach der Markteinführung erstellt.

¹ § 7 StVG (Halterhaftung), § 18 StVG (Fahrerhaftung).

Norm	Betrachtetes Fahrerassistenzsystem
ISO 15622 / 22179	Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control ACC)
ISO 15623	Frontalkollisionsschutzsysteme
ISO 11270	Lane Keeping Assistant Systems (Spurhalteassistent)
ISO 17361	Lane Departure Warning (Fahrstreifenverlassungswarnung)
ISO 17387	Lane Change Decision Aid Systems (Fahrstreifenwechselentscheidungsunterstützung)

Tabelle 2-1: Normen für Fahrerassistenzsysteme

In diesem Kapitel werden deduktiv mögliche Anforderungen an die Entwicklung eines NHA abgeleitet und am Ende in tabellarischer Form zusammengefasst. Ausgehend von Gesetzestexten werden Anforderungen formuliert und anhand von fachspezifischen Normen und Gestaltungsrichtlinien ergänzt. Des Weiteren ergeben sich Fragestellungen, die bei der Gestaltung von NHA hilfreich sein können. Eine Übersicht der relevanten Quellen zur Ableitung der Anforderungen ist in Abb. 2-1 dargestellt.

Betrachtete rechtliche Verordnungen, Normen und Standards zur Ableitung von Anforderungen an Nothalteassistenzsysteme

<div>Straßenverkehrsrecht</div> <ul style="list-style-type: none"> • Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) • Straßenverkehrsgesetz (StVG) • Pflichtversicherungsgesetz (PflVG) 	<div>Produkthaftungsrecht</div> <ul style="list-style-type: none"> • Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG) • Produzentenhaftung gemäß § 823 des Bürgerlichen Gesetzbuches (BGB) • Produktsicherheitsgesetz (ProdSG)
<div>Zulassungsrecht</div> <ul style="list-style-type: none"> • Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) • Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FZV) • Typgenehmigungen nach EG-Richtlinien (EG) • Genehmigungen nach Regelungen der Economic Commission for Europe der Vereinten Nationen (ECE) 	<div>Versicherungsrecht</div> <ul style="list-style-type: none"> • Versicherungsvertragsgesetz (VVG)
<div>Normen / Standards</div> <ul style="list-style-type: none"> • ISO 26262: Road Vehicles - Functional Safety • Code of Practice: Entwicklung und Validierung von Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) 	

Abbildung 2-1: Rechtliche Grundlagen mit Bezug zu Nothalteassistenzsystemen

2.1 Rechtliche Betrachtung

In der Arbeitsgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wurden automatische Fahrfunktionen aus juristischer Sicht betrachtet und hinsichtlich ihrer Zulassungsfähigkeit geprüft [43]. Die Ergebnisse werden im Folgenden im Hinblick auf Nothalteassistenzsysteme aufgegriffen und in Anlehnung an die Arbeit von Mirwaldt et al. [80] erweitert.

Verhaltensrecht gemäß der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO)

In der StVO werden unter anderem die verhaltensrechtlichen Pflichten des Fahrzeugführers bei der Fahrzeugbeherrschung und bei Fahrbahn- und Verkehrsbeobachtung beschrieben.² Unter der Annahme eines fahruntfähigen³ Fahrzeugführers fehlt im Hinblick auf NHA nach Gasser et al. der Adressat, dem eine Missachtung dieser Pflichten angelastet werden könnte. Somit kann der Fahrer nicht für die Überwachung der Fahrzeugsysteme verantwortlich sein. Ausgenommen von diesem Sonderfall sind Situationen, in denen der Fahrer sich wissentlich mit einer drohenden Fahruntfähigkeit an das Steuer eines Fahrzeuges setzt.

Halter- und Fahrerhaftung gemäß Straßenverkehrsgesetz (StVG)

Allgemein haftet der Halter eines Fahrzeugs für Schäden, die sich während des Betriebs ereignen.⁴ Darüber hinaus haftet der Fahrer gemäß § 18 StVG (Ersatzpflicht des Fahrzeugführers), der allerdings in der Haftpflichtversicherung des Halters mitversichert ist.⁵ Der Geschädigte hat zunächst einen Direktanspruch gegen den Versicherer des Fahrzeughalters.⁶ Unabhängig davon hat der Versicherer gegenüber dem Fahrer einen Ausgleichsanspruch, wenn der Schaden durch eine vorsätzliche oder grob fahrlässige Missachtung seiner Pflichten⁷ entstanden ist [68].

Im Falle einer regulären Auslösung eines NHA kann dem Fahrer keine Fahrlässigkeit vorgeworfen werden, solange er sich nicht wissentlich mit einer drohenden Fahruntfähigkeit zum Führen eines Fahrzeugs entscheidet [43]. Kommt es während des Führens von Fahrzeugen zu einem Unfall, wird bei unklarem Unfallhergang zur Klärung der Verschuldensanteile oftmals eine Ermittlung der Betriebsgefahr der am Unfall beteiligten Fahrzeuge durchgeführt.⁸ Dies bedeutet, dass für jedes Fahrzeug Einflussgrößen ermittelt werden, die das Eintreten eines Unfalls fördern oder die Unfallfolgen verschlimmern. Mögliche Einflussgrößen sind bspw. die Geschwindigkeit der Beteiligten vor dem Unfall, aber auch die Fahrzeugklasse oder der technische Zustand der Fahrzeuge ([19], § 23 Rn. 177). Auch das Eintreten einer medizinischen Fahruntfähigkeit

² § 3 Abs. 1 S. 1 StVO, in Übereinstimmung mit dem Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr (WÜ-StV), bspw. Artikel 8 Abs. 5 WÜ-StV, Artikel 13 Abs. 1 WÜ-StV [45].

³ In Gasser et al. erfolgt keine Unterscheidung zwischen medizinische bedingten Einschränkungen und einem kompletten Kontrollverlust.

⁴ § 7 StVG.

⁵ § 1 PfIVG.

⁶ § 115I VVG.

⁷ Schuldhaftige Verletzung der Obliegenheit.

⁸ § 7 Abs. 1 StVG.

kann sich entscheidend auf die Betriebsgefahr auswirken, wenn Auswirkungen auf den Unfallhergang nachweisbar sind [15]. Durch Fahrerassistenzsysteme hervorgerufene Schäden beim Betrieb sind durch die Halterhaftpflichtversicherung abgedeckt, so lange ihre Verwendung im Versicherungsvertrag nicht ausgeschlossen wird und eine Zulassung für den Betrieb derartiger Systeme vorliegt [43]. Dies wird auch beim Betrieb von NHA der Fall sein.

Produkthaftung des Herstellers

Neben dem Fahrer und Halter eines Fahrzeugs können auch Produzenten von Fahrzeugsystemen bei Schäden, die sich während des Betriebs ereignen, haftbar gemacht werden, wenn die Schäden durch eine Fehlerhaftigkeit im Produkt entstanden sind.⁹ Allerdings werden sich Geschädigte im Normalfall zunächst an die Haftpflichtversicherung des Halters wenden, da die Haftpflichtversicherung schuldunabhängig haftet, während bei Ansprüchen gemäß dem ProdHaftG die Produktfehler erst nachgewiesen werden müssen [123]. Nichtsdestotrotz hat der Hersteller eine Systementwicklung nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik zu gewährleisten, um das Risiko beim Betrieb neuer Fahrerassistenzsysteme zu minimieren [70]. Diesbezüglich sind neben dem bestimmungsgemäßen Gebrauch auch der naheliegende Fehlgebrauch und eine mögliche Fehlaktivierung des Systems abzudecken. Ist der Fahrer fahrtüchtig, muss er das System jederzeit kontrollieren und ggf. abbrechen können. Um eine potenzielle Fehlerhaftigkeit des Systems möglichst schon bei der Entwicklung zu vermeiden, umfasst der Stand der Technik unter anderem einschlägige Normen (siehe Kap. 2.2), die notwendigerweise beachtet werden müssen, aber nicht als hinreichend für die Absicherung anzusehend sind [14].

Im Gegensatz zu komfortsteigernden Fahrfunktionen kann für ein NHA angenommen werden, dass das System den Fahrer bei seinen Fahraufgaben nicht nur entlastet, sondern im Fall einer Fahrunfähigkeit die einzige Handlungsinstanz darstellt. Dies kann nach Gasser et al. zwar nicht als Maßstab für die Entwicklung von NHA angenommen werden, da somit ein erhebliches Risiko als Referenz erhoben würde, allerdings ist eine Systemgestaltung innerhalb bestimmter Systemgrenzen denkbar [43]. Demnach wäre es zulässig, wenn mit dem System außerhalb der Systemgrenzen, z. B. mangels fehlender Fahrstreifenmarkierungen, kein kontrollierter Anhaltetvorgang im eigenen Fahrstreifen durchführbar ist. Es wird allerdings gefordert, dass für die Entwicklung innerhalb der Systemgrenzen wiederum der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik berücksichtigt wird, was bspw. eine risikominimale Wahl von Anhaltepositionen oder die Wahl von geeigneten Umfeldsensoren zur Überwachung des Umfelds betrifft. So kann es im Allgemeinen als risikomindernd angenommen werden, das Fahrzeug während eines Notfalls auf Bundesautobahnen auf den Seitenstreifen zu manövrieren. Dies bedeutet allerdings auch eine erhöhte automatische Fahrzeit für den Fahrstreifenwechsel im Vergleich zu einem Anhaltemanöver im eigenen Fahrstreifen. Der Hersteller ist des Weiteren verpflichtet, Kunden über die Systemgrenzen zu instruieren, was durch einen Vermerk in der Bedienungsanleitung möglich ist.

⁹Gefährdungshaftung nach § 1 ProdHaftG, § 823 Abs. 1 BGB.

Für die Freigabe von automatischen Fahrfunktionen gilt es außerdem, die Systemzuverlässigkeit u. a. durch geeignete Testverfahren nachzuweisen. Von Winner und Weitzel wurde herausgestellt, dass hoch- und vollautomatische Fahrfunktionen aufgrund einer zu hohen Komplexität hinsichtlich der Situationswahrnehmung und -interpretation nicht mehr mit klassischen Testverfahren überprüfbar sein werden [144]. Somit werden zukünftig neue Methoden zur Testbarkeit dieser Funktionen benötigt. NHA nehmen hierbei eine Schlüsselrolle ein, da sich durch die Definition von bestimmten Systemgrenzen die Anzahl der benötigten Systemtests reduzieren lässt.

Zulassungsrecht

Fahrzeuge und die darin integrierten Bauteile benötigen eine EG-Typgenehmigung gemäß der Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FZV)¹⁰, um für den Betrieb im öffentlichen Straßenverkehr zugelassen zu werden. Die Erteilung der Typgenehmigung erfolgt über die Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments zur Genehmigung von Fahrzeugen und darin verbauten Systemen [28]. Diese Richtlinie nimmt wiederum Bezug auf die UN-ECE-Regelungen der UN-Wirtschaftskommission für Europa, in denen Vorschriften für die Gestaltung von Fahrzeugbauteilen enthalten sind [45]. An dieser Stelle soll nur auf die wesentlichen Vorschriften eingegangen werden, da für NHA noch keine finalen Funktionsbeschreibungen existieren. EG-Typgenehmigungen für neue Fahrerassistenzsysteme sind anpassbar, wenn die Systeme gegen aktuelle EU-Richtlinien verstoßen oder bislang nicht adressiert werden.¹¹ Dabei ist zu berücksichtigen, dass neue Regelungen nicht gegen Rechtsbeschlüsse, die die zuzulassenden Systeme behandeln, verstoßen [80]. Die Aktorik beeinflussende Fahrerassistenzsysteme, wie z. B. Systeme zur Assistenz bei der Spurhaltung oder der Einhaltung des Fahrzeugabstandes (ACC), werden bislang nicht von eigenen Typzulassungen behandelt. Vielmehr wird der zulässige Handlungsspielraum dieser Systeme in den Regelungen der zur Umsetzung ihrer Funktion benötigten Fahrzeugkomponenten beschrieben.

UN-ECE-Regelung 79 beschreibt die Zulassungsfähigkeit von Systemen mit Eingriff in die Lenkanlage [34]. So sind korrigierende Lenkeingriffe von Spurhalteassistenzsystemen bei höheren Geschwindigkeiten nur für kurze Dauern erlaubt.¹² Das dauerhafte Einleiten von Lenkmomenten ist derzeit nur für automatische Parkfunktionen zugelassen, welche in einem geringen Geschwindigkeitsbereich agieren.¹³ Für automatische Fahrstreifenwechsel und eine dauerhafte Spurführung im Falle eines Nothalteassistenzmanövers müsste somit in der UN-ECE-R 79 eine Anpassung der zugelassenen Gesamtdauer erfolgen [118].

Für die Durchführung eines automatischen Nothaltemanövers ist die automatische Aktivierung des Warnblinklichts denkbar, um nachfolgende Verkehrsteilnehmer zu warnen [43]. Gemäß UN-ECE-R 48 zur Genehmigung von Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen ist die Aktivierung

¹⁰§ 3 I S. 1 FZV.

¹¹Art. 20 RL 2007/46/EG.

¹²UN-ECE-R 79, 2.3.4.2.

¹³UN-ECE-R 79, 2.3.4.1.

des Warnblinklichts derzeit nur für die Signalisierung von Unfällen oder in Kombination mit Notbremsmanövern zulässig.¹⁴ Diese Regelung müsste somit für die automatische Aktivierung des Warnblinklichts durch ein NHA erweitert werden [118].

Zusammenfassung der rechtlichen Betrachtung

Aus rechtlicher Sicht wird ein Nothalteassistenzsystem voraussichtlich zulassungsfähig sein. Dies liegt hauptsächlich daran, dass das System nach der Aktivierung dazu beiträgt, die vom Notfallfahrzeug ausgehende Gefahr zu senken. Allerdings ergeben sich auch für NHA Randbedingungen, die während der Entwicklung und Inverkehrbringung zu berücksichtigen sind:

- Es muss sichergestellt werden, dass das System nur aktiviert wird, wenn der Fahrer tatsächlich aufgrund einer medizinischen Ursache fahruntfähig wird.
- Eine Fehlauslösung muss vom Fahrer beherrscht werden können. Gleichzeitig gilt es, die Aktivierung des Systems bei nicht bestimmungsgemäßen Gebrauch zu vermeiden. Dies ist durch die Wahl einer geeigneten Eskalationsstrategie möglich, die bspw. eine Aktivierung aufgrund von Müdigkeit verhindert.
- Das System soll gefahrenmindernd konstruiert sein. Dies bedeutet, dass das System nach dem Auslösezeitpunkt durch geeignete Fahrmanöver dazu beiträgt, die vom Fahrzeug ausgehende Betriebsgefahr zu senken. Situationsabhängig ist ein geeigneter Kompromiss zwischen der Wahl eines risikominimalen Anhalteorts und des dafür benötigten automatischen Fahrmanövers zu treffen.
- Situationen, in denen das System nicht funktioniert, wie z. B. aufgrund von Grenzen in der Umfeldwahrnehmung und -interpretation, sind zulässig. Diese Systemgrenzen sind aber eindeutig zu definieren. Bei der Entwicklung des Systems ist der Stand von Wissenschaft und Technik zu Fahrerassistenzsystemen zu berücksichtigen. Hierzu gehören einschlägige Normen und Richtlinien.
- Je nach Funktionsumfang bedarf es voraussichtlich Änderungen der UN-ECE-Regelungen 48 und 79, um ein automatisches Nothaltemanöver zuzulassen. Änderungen sind für eine kontinuierliche Applikation eines Lenkmoments zur Durchführung eines automatischen Fahrstreifenwechsels und für eine automatische Aktivierung des Warnblinklichts notwendig. Eine Änderung des WÜ-StV sowie der StVO wird, anders als bei anderen hoch- und vollautomatischen Fahrfunktionen, aller Voraussicht nach nicht erforderlich [118] sein.

2.2 Normen und Verordnungen

Die rechtliche Betrachtung hat ergeben, dass bei der Entwicklung von neuen Fahrerassistenzsystemen der Stand von Wissenschaft und Technik zu beachten ist, um mögliche Produktfehler

¹⁴UN-ECE-R 48, 6.6.7.2. [33]

bestmöglich zu vermeiden. Um eine Entwicklung von innovativen Fahrerassistenzsystemen gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik zu unterstützen, wurde von der Automobilindustrie im Rahmen des RESPONSE 3 Projekts¹⁵ der Code of Practice [67] erstellt. Dieser Leitfaden behandelt hauptsächlich die Systemauslegung von Fahrerassistenzsystemen sowie die Sicherstellung von deren Kontrollierbarkeit. Des Weiteren wird in der Literatur auf die ISO 26262 [60] hingewiesen, die bei der Entwicklung von sicherheitsrelevanten elektrischen Systemen in Kraftfahrzeugen zu berücksichtigen ist. Sie soll helfen, mögliche Gefahren des zu entwickelnden Systems zu identifizieren und Maßnahmen zu deren Beherrschung abzuleiten. Im Folgenden wird auf beide Richtlinien im Hinblick auf NHA eingegangen. Zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen gibt es eine Vielzahl weiterer Normen und Richtlinien, deren Betrachtung allerdings erst zielführend ist, wenn das System vollständig definiert ist und die Funktionsumfänge geklärt sind. Da sich NHA noch in der prototypischen Umsetzung befinden, liegt der Fokus primär auf Richtlinien, die die Konzeption von Fahrerassistenzsystemen adressieren.

2.2.1 Code of Practice

Der Code of Practice (CoP) soll helfen, Anforderungen an die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen abzuleiten. Der Fokus liegt dabei auf der Identifikation von Risiken bei der Systemauslegung, der Sicherstellung der Kontrollierbarkeit des Systems sowie der vollständigen Berücksichtigung des Standes der Wissenschaft und Technik. Der CoP soll den gesamten Entwicklungsprozess eines Systems begleiten, untergliedert in die Konzeptphase und die Serienentwicklung. Für die Klärung von Anforderungen für die Entwicklung eines NHA ist primär die Konzeptphase zu beachten, da dort Systemumfänge und -randbedingungen adressiert werden. Hierfür beinhaltet der CoP Checklisten, die während der Systemauslegung ausgefüllt werden und eine stetige Möglichkeit zur Verfolgung des Entwicklungsprozesses bieten.

Da diese Checklisten primär für die Überprüfung von Systemdefinitionen mit einem hohen Detaillierungsgrad ausgelegt sind, wird im Folgenden anstatt einer Systemüberprüfung eine Ableitung von möglichen Fragestellungen für die Gestaltung eines NHA durchgeführt. Diese Fragestellungen orientieren sich an den Anforderungen der rechtlichen Betrachtung (Kap. 2.1). Die Auswahl der betrachteten Inhalte aus der Checkliste beschränkt sich auf Aspekte, die Anknüpfungspunkte zum derzeitigen Stand der Technik zu NHA haben. Als Ausgangspunkt dafür wird die bereits zuvor genannte Funktionsbeschreibung nach Gasser et al. [43] verwendet. Die Ergebnisse werden in den Tab. 2-2 und 2-3 dargestellt.

In Tab. 2-2 sind die Aspekte des CoP zusammengefasst, die sich mit der Systemauslegung von Fahrerassistenzsystemen befassen. Neben der Beschreibung der Betriebsmodi wird ein Schwerpunkt auf die Systemgrenzen gelegt.

¹⁵Unterprojekt des EU-geförderten Projekts PReVENT (Preventive and Active Safety Applications Integrated Project) [121].

In Zeile 1 werden die nach Gasser et al. definierten Betriebsmodi eines Nothalteassistenzsystems beschrieben. Aus der rechtlichen Betrachtung in Kap. 2.1 ergibt sich die Fragestellung, ob die Möglichkeit zu einer systematischen Auswahl von Manövern besteht, um in jeder Verkehrssituation risikominimal zu reagieren. Hierbei kann eine Gefahren- und Risikoanalyse (Zeile 2) hilfreich sein.

Bei der Aktivierung des Systems (Zeile 3) sind sowohl eine automatische als auch eine manuelle Variante denkbar. Diesbezüglich ist zu klären, wie sich medizinische Notfälle erkennen lassen, ohne dass der Fahrer beeinflusst bzw. von seiner Fahraufgabe abgelenkt wird. Außerdem ergibt sich mit Hinblick auf die manuelle Aktivierung die Fragestellung, ob der Fahrer während eines Notfalls das System noch aktivieren kann.

Bei der Betrachtung der Systemgrenzen (Zeilen 4-6) ergeben sich zwei Haupteinflussgrößen: die Umfeld- und Fahrerzustandssensorik. Da das Eintreten eines medizinischen Notfalls voraussichtlich nicht an eine bestimmte Fahrsituation gebunden ist, gilt es zu klären, welche Situationen mit bestimmten Sensorik-Sets abdeckbar sind und wie die Systemgrenzen erweitert werden können. Des Weiteren ergibt sich hinsichtlich der Systemgrenzen der Umfeldwahrnehmung die Fragestellung, ob andere Verkehrsteilnehmer durch besondere Warnstrategien zu einem kooperativen Verhalten motiviert werden können, um die Durchführung eines automatischen Fahrmanövers zu erleichtern. Hinsichtlich der Fahrerzustandssensorik ist bislang unbekannt, welche medizinischen Notfälle im Fahrzeug auftreten und mit welchen Sensoren sie detektiert werden können. Da ein Kontrollverlust des Fahrzeugs unmittelbar zu einer gefährlichen Situation führen kann, ist außerdem die Dauer zur Erkennung der Notfälle von Interesse.

In Tab. 2-3 werden Aspekte des CoP hinsichtlich der Kontrollierbarkeit zusammengefasst. Diesbezüglich ergibt sich die Fragestellung, wie ein Fahrer, der möglicherweise fahrunfähig, aber noch nicht bewusstlos ist, während eines medizinischen Notfalls geeignet gewarnt werden kann (Zeile 7). Außerdem muss der Fahrer im Fall einer Fehlauflösung ausreichend über den Systemzustand informiert werden. Hieraus ergeben sich auch Beeinflussungsmöglichkeiten zur Vermeidung eines Fehlgebrauchs des Systems (Zeile 8). Der naheliegende Fehlgebrauch des Systems liegt u. a. beim Fahren unter Müdigkeit, der ggf. durch eine geeignete Eskalationsstrategie ausgeschlossen werden kann.

Da während des Betriebs eine Übersteuerbarkeit des Systems sichergestellt werden muss, ist zu überlegen, wie eine geeignete Abbruchstrategie durch den Fahrer aussehen kann. Insbesondere bei der Wahl von naheliegenden Bedienelementen für den Abbruch (Bremspedal, Lenkung) ist zu überlegen, ob das System nicht versehentlich deaktiviert werden kann. Außerdem gilt es, die Anforderungen an das Bedienelement zur manuellen Aktivierung des Systems zu klären (Zeile 9).

Da durch das System voraussichtlich Erwartungen der Systemnutzer über die Systemgrenzen der erkennbaren medizinischen Notfälle hinaus geweckt werden, wird eine entsprechende Sensibilisierung notwendig sein, um die Grenzen des Systems zu kommunizieren (Zeile 10).

Nr.	Fragenbereich	Aktueller Stand	Mögliche Fragestellungen
Betriebsmodi			
1	A 13. Definition sämtlicher Betriebsmodi	- Manuelle Fahrt (System deaktiviert) → Übernahmeaufforderung → Automatischer Modus → Stillstand (Notruf, Warnblinklicht, Elektronische Parkbremse, Tür entriegeln)	- Wie sehen die risikominimalen Manöver für die verschiedenen Betriebssituationen des Systems aus?
2	A 28 Gefahrenanalyse für das System	- Noch nicht durchgeführt	- Kann eine Gefahrenanalyse verwendet werden, um für jede Betriebssituation eine Fahrstrategie zu definieren?
3	A 24. Aktivierung des Systems	- Automatische Aktivierung durch Fahrerzustandssensorik - Manuelle Aktivierung durch ein spezielles Bedienelement	- Wie lassen sich medizinische Notfälle im Fahrzeug detektieren, ohne dass der Fahrer Komforteinbußen hat? - Ist der Fahrer in der Lage, trotz des Notfalls das System noch manuell zu aktivieren?
Systemgrenzen			
4	A 19. / 22. Systemgrenzen durch Infrastruktur (Umfeld- wahrnehmung)	- bislang: Einsatz auf Autobahn oder autobahnähnlichen Straßen - Dynamische Objekte werden begrenzt erkannt - Bei schlechter Umfeldwahrnehmung evtl. Verlassen der Fahrbahn - Die Höchstgeschwindigkeit des Systems ergibt sich aus der Sichtweite der Umfeldsensorik	- Welche Umfoldsensoren werden benötigt, um die verschiedenen Verkehrssituation wahrnehmen und interpretieren zu können? - Wie lassen sich diese Systemgrenzen erweitern?
5	A 24. Systemgrenzen durch Fahrerzustands- sensorik	- Voraussichtlich nicht alle medizinischen Notfälle detektierbar - Unsicherheit wird zu Fehldetektionen führen - Schlaf voraussichtlich nicht von medizinischem Notfall unterscheidbar	- Welche medizinischen Notfälle werden erkannt? - Wie werden diese medizinischen Notfälle detektiert? - Welche Sensoren werden benötigt, um die Notfälle zu erkennen? - Wie lange dauert die Erkennung von medizinischen Notfällen?
6	A 22-1. Systemgrenzen bei Interaktion mit anderen Verkehrs- teilnehmern	- Ein automatischer Fahrstreifenwechsel zum Erreichen des Seitenstreifens auf Bundesautobahnen benötigt voraussichtlich größere Lücken als ein manuell gefahrener.	- Können andere Verkehrsteilnehmer über den Notfall informiert und zu kooperativem Verhalten motiviert werden, um größere Verkehrslücken für zu schaffen?

Tabelle 2-2: Auszug aus dem Code of Practice (CoP) mit Hinblick auf den aktuellen Stand zu Nothalteassistenzsystemen nach Gasser et al. [43] und daraus ableitbaren Fragestellungen zur **Systemauslegung**. Die zugehörigen Fragen des CoP sind in der ersten Spalte angegeben.

Nr.	Fragenbereich	Aktueller Stand	Mögliche Fragestellungen
Warnungen / Darstellung			
7	A 2-1. / 26-2. Warnungen verständlich darbieten	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrer wird informiert, dass das System aktiv ist - Fahrer wird über bevorstehende Manöver informiert - Übernahmeaufforderungen während und nach der Aktivierung des Systems 	<ul style="list-style-type: none"> - Wird durch die HMI-Eskalation eine Fehlaktivierung (z. B. durch schlafende Fahrer) vermieden? - Wie wird der Fahrer über die Systemzustände informiert?
Fehlgebrauch / Missbrauch			
8	A 5-6 / 26 Fehlgebrauch	<ul style="list-style-type: none"> - Vorhersehbarer Fehlgebrauch: Müdigkeit, System ausprobieren - Missbrauch bei Alkohol- und Drogenkonsum wird nicht adressiert 	<ul style="list-style-type: none"> - Wie können Fehlgebrauch/ Missbrauch über eine Eskalation ausgeschlossen werden?
Übersteuerbarkeit			
9	A 3 Abbruchmöglichkeit durch den Fahrer gewährleisten	<ul style="list-style-type: none"> - Abbruch durch: Bremsung, Lenkbewegung, manuelle Deaktivierung (Schalter), Kick-Down 	<ul style="list-style-type: none"> - Kann das System versehentlich deaktiviert werden (z. B. bei einem epileptischen Anfall)? - Wie muss der manuelle Schalter zur Deaktivierung aussehen? - Können andere Insassen eingreifen?
Systemerwartungen			
10	A 5-11 Erwartungen an das System	<ul style="list-style-type: none"> - Systemgrenzen sind erlaubt - Instruktion des Fahrers über Systemgrenzen notwendig (z. B. über die Bedienungsanleitung) 	<ul style="list-style-type: none"> - Wie sieht die Instruktion aus, damit ein Fahrer mit einem drohenden medizinischen Notfall nicht zum Fahren motiviert wird?

Tabelle 2-3: Auszug aus dem Code of Practice (CoP) mit Hinblick auf den aktuellen Stand zu Nothalteassistenzsystemen und daraus ableitbaren Fragestellungen zur **Kontrollierbarkeit**. Die zugehörigen Fragen des CoP sind in der ersten Spalte angegeben.

2.2.2 Gefahren- und Risikoanalyse nach ISO 26262

Die Betrachtung des Code of Practice hat ergeben, dass eine Gefahren- und Risikoanalyse gemäß ISO 26262 eine Möglichkeit zur Ableitung weiterer Anforderungen an die Gestaltung eines NHA bieten kann.

Die ISO 26262 [60] verfolgt eine risikominimale Entwicklung von elektrischen, elektronischen und programmierbar elektronischen Systemen (E/E/PE-Systeme) im Fahrzeug, zu denen auch Fahrerassistenzsysteme gehören [126]. Sie ist 2012 als fahrzeugspezifisches Derivat der IEC 61508 [58] entstanden. Ziel dieser Norm ist es, den gesamten Produktentstehungsprozess eines elektrischen Systems zu begleiten, sicherheitsrelevante Risiken zu identifizieren, Maßnahmen zu deren Minimierung abzuleiten sowie Tests zur Sicherstellung der Maßnahmenumsetzung zu definieren. Abb. 2-2 zeigt die Bestandteile des Sicherheitslebenszyklus, unterteilt in die Konzeptphase (Concept phase), Entwicklungsphase (Product development) und die Zeit nach dem Produktionsbeginn (After SOP).

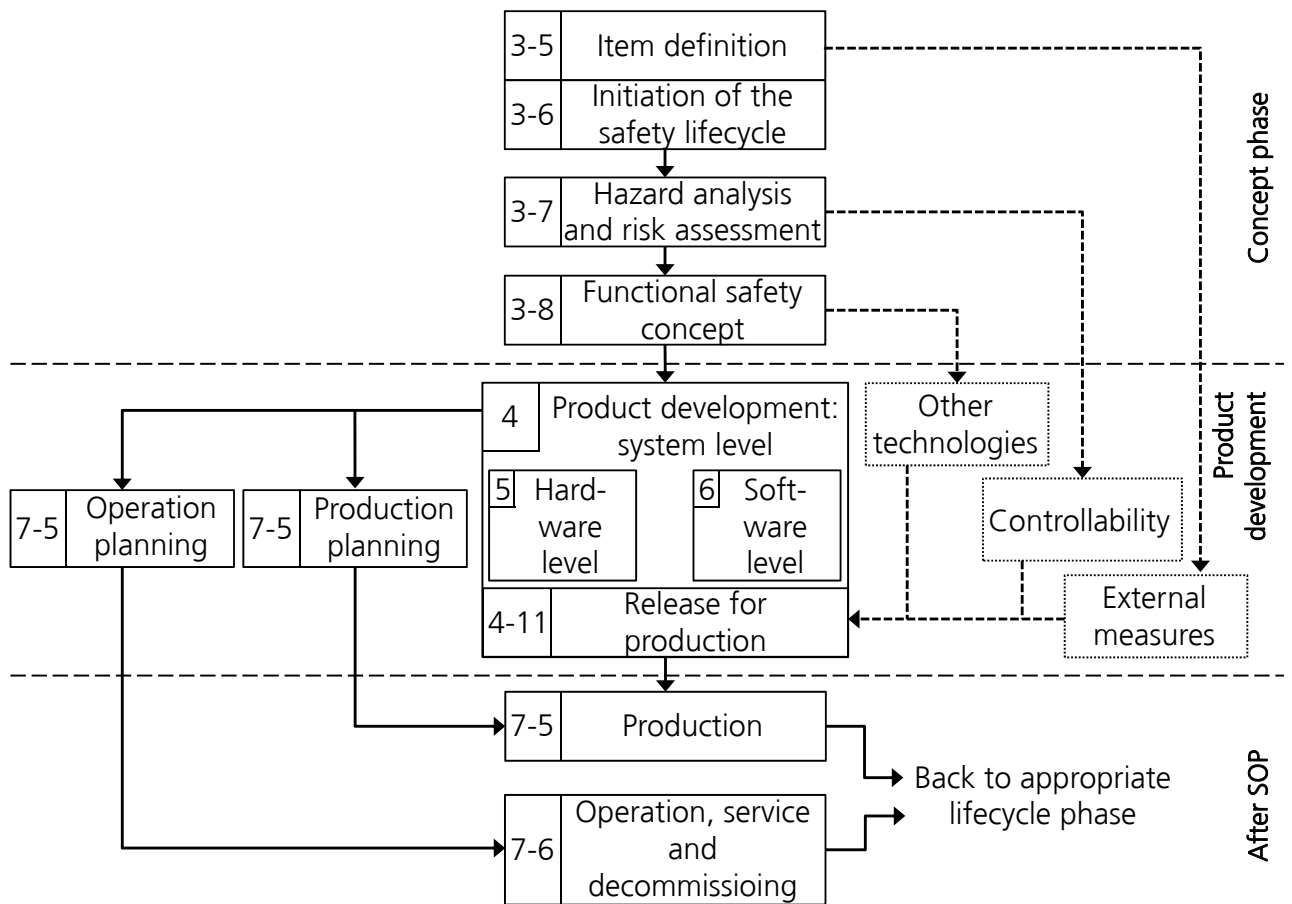


Abbildung 2-2: Sicherheitslebenszyklus nach ISO 26262 [60]

Teil 3 der Norm adressiert die Konzeptphase eines Systementwicklungsprozesses. Gemäß den Abschnitten 3-5 und 3-6 erfolgen zunächst die Systembeschreibung und die Identifikation von Randbedingungen für das System. Im Anschluss daran werden im Teil der Gefahren- und Risikoanalyse (3-7) potenzielle Gefahren für die Betriebszustände des Systems identifiziert und klassifiziert. Die Klassifikation erfolgt nach einer Metrik, die für die zuvor beschriebenen Situationen das Schadensausmaß (Severity), die Auftretenswahrscheinlichkeit (Exposure) und die Kontrollierbarkeit des drohenden Fehlers durch den Fahrer (Controllability) bestimmt. Im Anschluss daran werden die Werte in einer sogenannten Risikomatrix ins Verhältnis gesetzt und das sogenannte Automotive Safety Integrity Level (ASIL) bestimmt. In Abhängigkeit des ASIL der jeweiligen Gefahr werden in 3-8 Sicherheitsziele definiert, die im weiteren Verlauf der Entwicklung konstruktiv abzudecken sind.

Hinsichtlich der Ableitung von Anforderungen an die Gestaltung eines NHA bietet die Gefahren- und Risikoanalyse (G&R) nach ISO 26262 einen Ansatz, potentielle Risiken für die Betriebssituationen von Fahrerassistenzsystemen zu klassifizieren. Da diese Vorgehensweise für vollständig definierte Systeme mit festen Randbedingungen ausgelegt ist, bedarf es einer Anpassung der Methode für den Fall eines NHA. Es ergibt sich die Fragestellung, ob die Vorgehensweise der Norm dazu verwendet werden kann, risikominimale Fahrmanöver für Betriebssituationen systematisch abzuleiten, in dem potentielle Gefahren identifiziert und minimiert werden. Diese Fragestellung wird in Kap. 3 betrachtet.

2.3 Zusammenfassung der Anforderungen und Abgrenzung der Arbeit

In Tab. 2-4 sind die Anforderungen zusammengefasst, die in Kap. 2 für die Gestaltung eines NHA auf der Grundlage von Gesetzen, Normen und Richtlinien abgeleitet wurden. Zusätzlich beinhaltet sind mögliche Fragestellungen, die sich bei der Betrachtung des Code of Practice ergeben haben. Nachfolgend wird kurz erläutert, in welchen Kapiteln die Inhalte der Anforderungsliste vertieft werden.

In Kap. 3 wird untersucht, wie die zentrale Anforderung einer risikominimalen Funktionsauslegung in einer Systemarchitektur mit eindeutig definierten Systemgrenzen umgesetzt werden kann. Außerdem werden mögliche Beispielausprägungen der Systemkomponenten betrachtet.

Zur Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug wird in Kap. 4 betrachtet, welche Notfälle sich beim Führen eines Fahrzeugs ereignen können und mit welchen Technologien sie detektierbar sind. Hierbei wird die Anforderung einer nicht-invasiven und minimal kontaktgebundenen Messung der benötigten Daten berücksichtigt.

In Kap. 5 wird der Fragestellung nachgegangen, ob durch gezielte Warnmanöver andere Verkehrsteilnehmer über das Eintreten eines medizinischen Notfalls informiert werden können. Das Ziel dabei ist es, durch das kooperative Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer eine Vergrößerung des Abstandes zwischen den Fahrzeugen zu erzielen, was die Durchführung von automatischen Fahrmanövern erleichtert.

Außerdem wird in allen Kapiteln betrachtet, ob die Funktionsumfänge des NHA mit serienmäßigen oder seriennahen Technologien realisierbar sind (Wunschforderung). Dieser Aspekt hat primär einen Einfluss auf die Wahl der Sensoren zur Erkennung des Fahrerzustands und des Fahrzeugumfelds. Allerdings wird auch bei Betrachtung der Möglichkeiten zur Umfeldwarnung ein Fokus auf die Verwendung von serienmäßigen Warnelementen gelegt.

Unter- teilung	Nr.	Art	Anforderung / Fragestellung (FF - Festforderung, FR - Fragestellung, WF - Wunschforderung)	Kapitel
Haupt- anfor- derung	1	FF	Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug und Einleitung eines automatischen Nothaltemanövers	alle
Funktionsauslegung	2	FF	Das System wird nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (inkl. Gesetzen, Normen, Richtlinien) ausgelegt.	2
	3	FF	Es erfolgt eine risikominimale Auslegung des Systems, um nach der Aktivierung die Betriebsgefahr zu minimieren.	3
	4	FF	Die Systemgrenzen (Umfeldsensorik, Fahrerzustandssensorik) werden eindeutig bestimmt.	
	5	FR	Eignet sich die Gefahren- und Risikoanalyse nach ISO 26262 zur risikominimalen Auslegung des Systems?	
Umfeld- sensorik	6	FF	Die durch die Umfeldsensorik erkennbaren Verkehrssituationen sind eindeutig beschrieben.	
	7	FR	Wie können die Systemgrenzen der Umfeldsensorik beschrieben und erweitert werden?	
	8	WF	Es werden serienmäßige oder seriennahe Umfeldsensoren verwendet.	
Human Machine Interface (HMI)	9	FF	Fehlauslösungen des Systems sind durch den Fahrer kontrollierbar.	
	10	FF	Der naheliegende Fehlgebrauch (Müdigkeit) wird durch eine geeignete Eskalation ausgeschlossen.	4
	11	FR	Wie wird der Fahrer über die Systemzustände informiert?	
	12	FR	Wie muss das Bedienelement zur manuellen Aktivierung des Systems gestaltet werden? Können weitere Insassen eingreifen?	
	13	FR	Kann sichergestellt werden, dass der Fahrer das System nicht versehentlich deaktiviert? (z.B. bei einem epileptischen Anfall)	
Fahrerzustands- sensorik	14	FF	Zur Erkennung von medizinischen Notfällen werden nicht-invasive oder minimal kontaktgebundene Sensoren verwendet	
	15	FR	Welche medizinischen Notfälle muss das System erkennen?	
	16	FR	Welche Sensoren werden benötigt, um die Notfälle zu erkennen?	
	17	FR	Wie lange dauert es, den medizinischen Notfall zu erkennen?	
	18	FR	Kann der Fahrer das System trotz eines medizinischen Notfalls manuell aktivieren?	
	19	WF	Es werden Sensoren zur Fahrerzustandserkennung mit prinzipiellem Serienpotential verwendet.	
Umfeld- warnung	20	FR	Wie können andere Verkehrsteilnehmer zu einem kooperativem Verhalten motiviert werden, um ein automatisches Nothaltemanöver zu ermöglichen?	5
	21	WF	Zur Umsetzung der Warnstrategien werden serienmäßige Warnelemente verwendet.	

Tabelle 2-4: Zusammenfassung der Anforderungen an die Gestaltung eines Nothalteassistenzsystems sowie mögliche Fragestellungen

3 Konzept der Systemarchitektur eines Nothalteassistenzsystems und Beispielausprägungen

In diesem Kapitel werden die Systemarchitektur eines NHA und Beispielausprägungen bestimmter Systemkomponenten betrachtet. Die Grundlage dafür bildet die zentrale Anforderung nach einer risikominimalen Systemauslegung (gemäß Kapitel 2). Hierfür werden zunächst Maßnahmen zur Senkung der Betriebsgefahr nach erfolgter Aktivierung des NHA definiert. Im Anschluss daran werden mögliche Umfänge der Funktion inkl. der jeweiligen Systemgrenzen betrachtet und in einer Systemarchitektur dargestellt. Aufbauend auf bestehende Architekturen für hochautomatische Fahrfunktionen werden für einzelne Komponenten wie z. B. die Umfeldwahrnehmung oder das Human Machine Interface (HMI) spezifische Anpassungen zur Realisierung des Nothalteassistenzsystems diskutiert.

Im Verlauf des Kapitels werden sinngemäß Inhalte von Mirwaldt et al. zur Auslegung von NHA und möglichen Umfeldsensorkonzepten verwendet und erweitert [80][81].

3.1 Maßnahmen zur Senkung der Betriebsgefahr durch das Nothalteassistenzsystem

In Kap. 2 wurde festgestellt, dass nach einer Aktivierung eines NHA eine Senkung der Betriebsgefahr des Notfallfahrzeugs wichtig ist, um im Falle eines Verkehrsunfalls das Schadensausmaß zu senken. Dies wird sich ggf. auch bei einer anschließenden Schadensregulierung positiv auf die Haftungsverteilung auswirken.

Nach Greger lässt sich die von einem Fahrzeug ausgehende Betriebsgefahr in eine abstrakte und konkrete unterteilen [47]. Die abstrakte Betriebsgefahr beschreibt die grundsätzliche Gefährlichkeit eines Fahrzeugs und wird z. B. von der Art des Fahrzeugs beeinflusst. So wird bei einem Verkehrsunfall mit Beteiligung eines PKW und LKW für den LKW zunächst eine höhere Betriebsgefahr angenommen [42]. Die konkrete Betriebsgefahr hingegen setzt sich aus besonderen Umständen zusammen, die die Betriebsgefahr erhöhen können. Die konkreten Einfluss-

faktoren hierfür sind situationsabhängig, allerdings können nach Garbe und Hagedorn insbesondere folgende Aspekte dazu beitragen [42]:

- Versagen oder Mangelhaftigkeit der Vorrichtungen des Kfz (z. B. defekte Lichtanlage)
- Fehlerhafte oder verkehrswidrige Fahrweise (Verstöße des Fahrers gegen die StVO, z. B. Vorfahrtsverstoß).
- Risikosteigernde Verkehrsvorgänge, auch wenn dieser kein Verkehrsverstoß ist (z. B. Überholmanöver, erhöhte Geschwindigkeit)

Im Folgenden werden Maßnahmen für die Funktionsgestaltung des Nothalteassistenzsystems abgeleitet, die zur Senkung der Betriebsgefahr nach erfolgter Aktivierung beitragen können. Im Gegensatz zu teilautomatisierten Fahrerassistenzsystemen hat der Fahrer bei NHA nur noch bedingt einen Einfluss auf die Betriebsgefahr seines Fahrzeugs. Unter der Annahme eines fahr-unfähigen Fahrers wird die Betriebsgefahr höchstens unmittelbar vor der Aktivierung des Systems von ihm beeinflusst. Nach der Aktivierung wird die Steuerung des Fahrzeugs vom System selbst durchgeführt.

Die Forderung, das nach dem Eintreten des Notfalls quasi führerlos fahrende Fahrzeug geregelt in den **Stillstand** zu überführen, erscheint zunächst trivial. Allerdings kann sie aus Sicht der Gefährdungshaftung weiter eingegrenzt werden. Nach Müller [86] ist die Betriebsgefahr eines Fahrzeugs in Korrelation mit seiner kinetischen Energie zu setzen, die wiederum quadratisch von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängt. Demnach ist eine Geschwindigkeitserhöhung nach Aktivierung des Systems gänzlich zu vermeiden.

Da das Eintreten eines medizinischen Notfalls höchstwahrscheinlich in jeder Verkehrssituation möglich ist, ergeben sich Einschränkungen für die zuvor geforderte Geschwindigkeitsreduktion. Insbesondere für Verkehrswege mit mehreren Fahrstreifen und teilweise ohne Geschwindigkeitsbegrenzungen wird das Anhalten im eigenen Fahrstreifen zu einer Erhöhung der Betriebsgefahr führen, da das Risiko von Auffahrunfällen gesteigert wird. Dies kann z. B. bei einem notfallbedingten Abstellen des Fahrzeugs auf dem linken Fahrstreifen einer Bundesautobahn mit drei Fahrstreifen der Fall sein. Gemäß der StVO sind zwar alle Verkehrsteilnehmer zur Einhaltung des Sichtfahrgebots aufgefordert,¹ allerdings lässt sich das Risiko von Auffahrunfällen senken, wenn Fahrer im Fall einer Notsituation den Seitenstreifen zum Abstellen des Fahrzeugs anfahren [100]. Somit ließe sich eine Erhöhung der Betriebsgefahr für einen **Fahrstreifenwechsel in Richtung des Seitenstreifens** rechtfertigen. Eine Ausnahme bilden hierbei Stausituationen, in denen die Geschwindigkeit aller Verkehrsteilnehmer im Vergleich zur Richtgeschwindigkeit bereits gering ist. Hierbei ist ein Anhalten im eigenen Fahrstreifen denkbar.

Ein Sonderfall ergibt sich bei der Betrachtung von Autobahnabschnitten, auf denen z. B. aufgrund einer Baustelle kein Seitenstreifen vorhanden ist. Eine **automatische Weiterfahrt bis zu Verkehrsabschnitten mit Seitenstreifen** ist denkbar, so lange durch die automatische

¹§ 3 Abs. 1 StVO.

Fahrt die Betriebsgefahr im Vergleich zum Anhalten auf dem Fahrstreifen geringer ist. Die dafür benötigten Informationen können digitale Karten in Verbindung mit einer ausreichend präzisen Lokalisation des Fahrzeugs liefern. Ist ein Fahrstreifenwechsel aufgrund von anderen Verkehrsteilnehmern nicht möglich, empfiehlt sich das Einhalten von **fahrstreifenabhängigen Mindestgeschwindigkeiten**, die vom System nicht unterschritten werden, um Auffahrunfälle nachfolgender Verkehrsteilnehmer zu vermeiden. Grundlose Langsamkeit auf Bundesautobahnen wurde nämlich in der Rechtsprechung für Einzelfälle als gefahren erhöhend angesehen [4]. Diese Mindestgeschwindigkeiten könnten sich bspw. an Durchschnittsgeschwindigkeiten für einzelne Fahrstreifen² oder an Geschwindigkeiten unterhalb der maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit orientieren.

Durch die Einschränkung des Systems hinsichtlich des Beschleunigungsvermögens wird es bei Verkehrssituationen mit einem erhöhten Verkehrsaufkommen voraussichtlich erschwert sein, einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Hierfür erscheint es hilfreich, andere Verkehrsteilnehmer über die Notsituation zu informieren und mithilfe einer geeigneten **Warnstrategie** zu einem kooperativen Verhalten zu motivieren. Es ist denkbar, dass Warnelemente verwendet werden, die über die nach § 15 StVO geforderte Aktivierung des Warnblinklichts zur Kennzeichnung von Gefahrenstellen hinausgehen. In Kap. 5 werden hierfür geeignete Warnelemente im Rahmen einer Probandenstudie untersucht.

Zur Durchführung eines automatischen Nothaltemanövers muss die Detektierbarkeit der Fahrbahn sowie anderer Verkehrsteilnehmer sichergestellt werden. Für den Fall, dass die Daten der Umfeldsensorik keine ausreichende Informationsqualität liefern, sind geeignete **Abbruchszenarien** für den Notbetrieb des Systems zu definieren, da der Fahrer als Rückfallebene im Vergleich zu anderen hochautomatischen Systemen voraussichtlich nicht zur Verfügung steht. Je nach Güte der Umfeldsensordaten ist bspw. ein Abbremsen des Fahrzeugs im eigenen Fahrstreifen denkbar.

Im städtischen Umfeld sowie auf Landstraßen ist es im Vergleich zur Autobahn denkbar, dass das Notfallfahrzeug mittengeführt oder mit einer Ablage zum rechten Fahrbahnrand im eigenen Fahrstreifen mit begrenzter Verzögerung in den Stillstand überführt wird. Das Risiko von Auffahrunfällen ist gegenüber Notsituationen auf Autobahnen geringer, weil die zu erwartenden Relativgeschwindigkeiten nachfolgender Verkehrsteilnehmer niedriger sind. Allerdings ergibt sich aufgrund der Fahrbahnkrümmung und -steigung eine Gefahrenquelle hinsichtlich der Kennzeichnung der Halteposition des Fahrzeugs. Gemäß § 15 StVO sind Fahrzeugführer zur Kennzeichnung einer Gefahrenstelle durch das Aufstellen des Warndreiecks verpflichtet. Da ein fahruntfähiger Fahrer dieser Pflicht voraussichtlich nicht nachkommen kann, ist es vorteilhaft, dies bei der **Wahl der Halteposition des Fahrzeugs** zu berücksichtigen. So kann bspw. anhand von Kartendaten ermittelt werden, welche Abschnitte für nachfolgende Verkehrsteilnehmer auch ohne Warndreieck einsehbar sind.

²Durchschnittsgeschwindigkeiten auf der A5 bei geringer Verkehrsdichte (ohne Geschwindigkeitsbegrenzung, Zeitraum 7:00-12:00 Uhr), nach Fahrstreifen: 125 km/h links, 120 km/h Mitte, 93 km/h rechts (nach [64]).

Zusammenfassend lassen sich folgende Maßnahmen zur Senkung der Betriebsgefahr während eines automatischen Nothaltemanövers ableiten (in Anlehnung an [80]):

- Keine automatische Erhöhung der Fahrzeuggeschwindigkeit nach der Aktivierung des NHA.
- Durchführung von automatischen Fahrstreifenwechseln zum Anfahren des Seitenstreifens für eine risikominimale Anhalteposition des Fahrzeugs.
- Automatische Weiterfahrt auf dem rechtem Fahrstreifen zur Erreichung von Streckenschnitten mit Seitenstreifen, falls zum Zeitpunkt der Aktivierung keiner vorhanden ist.
- Einhaltung von fahrstreifenabhängigen Mindestgeschwindigkeiten zur Vermeidung von Auffahrunfällen.
- Nachfolgende Verkehrsteilnehmer zur Ermöglichung von automatischen Fahrstreifenwechseln warnen.
- Notfallstrategien definieren, die im Falle eines Systemfehlers das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand überführen.
- Berücksichtigung des Streckenverlaufs bei der Auswahl der Anhalteposition des Notfallfahrzeugs, da nachfolgende Verkehrsteilnehmer nicht durch das Warndreieck gewarnt werden können.

3.2 Definition von Funktionsumfängen anhand der technische Umsetzbarkeit der Maßnahmen

Als Grundlage für die Systemarchitektur werden nachfolgend Funktionsumfänge des NHA definiert, die sich aus der technischen Umsetzbarkeit der Maßnahmen zur Senkung der Betriebsgefahr ergeben. Die Umfänge unterscheiden sich in der Art der durchführbaren Fahrmanöver und der damit verbundenen Systemkomplexität.

Die Umsetzung aller in Kap. 3.1 definierten Maßnahmen zu einer Funktion ist voraussichtlich mit einem großen Entwicklungsaufwand verbunden, da eine Vielzahl von Sensoren zur Beobachtung des Fahrzeugumfelds sowie eine Absicherung von komplexen Fahrmanövern benötigt werden. Hinzu kommt, dass sich ein medizinischer Notfall voraussichtlich in jeder Verkehrssituation ereignen kann, so dass zunächst eine Applikation des Systems für jede Situation notwendig erscheint.

Die rechtliche Betrachtung in Kap. 2.1 hat allerdings ergeben, dass ein NHA im Gegensatz zu anderen hoch- und vollautomatischen Systemen für eine Serienfreigabe nicht alle denkbaren Verkehrssituationen beherrschen muss. Vielmehr ist es möglich, Systemgrenzen zu definieren,

die gemäß dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik abzusichern sind. Die Systemgrenzen ergeben sich in erster Linie bei der sensorischen Wahrnehmung und Interpretation von Verkehrssituationen. Durch eine Eingrenzung der Funktionsumfänge lassen sich die Anforderungen an Entwicklung und Absicherung der Umfeldwahrnehmung senken. Somit ist eine Freigabe des NHA denkbar, was für komfortsteigernde hoch- und vollautomatische Systeme derzeit aufgrund einer zu hohen Situationskomplexität nicht möglich ist [145]. Eine erste Markteinführung des NHA mit begrenztem Funktionsumfang wird zusätzlich dazu dienen, erste Erfahrungswerte für die Produktbeobachtung zu liefern, was sich wiederum positiv auf eine Produktverbesserung und -erweiterung auswirken kann.

Weiterhin wird sich für die Freigabe der Systemkomponenten begünstigend auswirken, dass medizinische Notfälle im Fahrzeug und somit Aktivierungen der automatischen Fahrfunktion selten sind. Bei der für Fahrerassistenzsysteme geforderten Gefahren- und Risikoanalyse gemäß ISO 26262 geht nämlich die Auftretenswahrscheinlichkeit von Betriebssituationen in die Berechnung des ASIL ein, woraus sich wiederum Anforderungen in Form von Redundanzen und Absicherungen im System ergeben (vgl. Kap. 2.2.2). Eine Voraussetzung für die geringe Auftretenswahrscheinlichkeit wird allerdings die Absicherung des Systems gegen Fehlauslösungen sein, was durch die Entwicklung von geeigneten Eskalationsstufen während der Aktivierung möglich ist.

Aus den zuvor genannten Gründen liegt der Ansatz nahe, das NHA so auszulegen, dass mit aktuell verfügbaren Komponenten erste Systeme realisierbar werden. Nachfolgende Ausbaustufen können die Funktionsumfänge des NHA erweitern. Aus diesem Grund werden im Folgenden drei Funktionsumfänge diskutiert, die sich im Umfang der durchführbaren Manöver und somit in der Differenzierbarkeit von Verkehrssituationen unterscheiden (vgl. Abb. 3-1).

Als Funktionsumfang (Umfang A) mit der geringsten Komplexität ist ein automatisches Nothaltemanöver im eigenen Fahrstreifen denkbar. Somit wird die Fahrzeuggeschwindigkeit als Hauptgefahrenquelle eines Fahrzeugs mit fahruntfähigem Fahrzeugführer gesenkt. Die Längsführung beschränkt sich auf eine moderate Verzögerung³, bei der der Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen geregelt wird. Unter der Annahme, dass die globale Position des Fahrzeugs bekannt ist,⁴ kann die Halteposition des Fahrzeugs so variiert werden, dass diese für nachfolgende Verkehrsteilnehmer gut erkennbar ist. Außerdem kann frühzeitig auf Kurvenradien reagiert werden, um zu hohe Kurvengeschwindigkeiten zu vermeiden. Im städtischen Umfeld kann bspw. das Halten auf Verkehrskreuzungen vermieden werden. Die Querverführung beschränkt sich auf eine Fahrstreifenmittenführung, die unter Zuhilfenahme von Kartendaten auf einen Spurversatz in Richtung der rechten Fahrstreifenmarkierung erweitert werden kann.

Als Erweiterung wird das Fahrzeug in Funktionsumfang B in einem geeigneten Straßenabschnitt auf den Seitenstreifen gefahren. Hier wird die Befahrbarkeit des Seitenstreifens durch geeignete

³Die Maximalverzögerung kann sich z. B. an der Obergrenze eines ACC-Systems von 3 m/s^2 orientieren [59]. Allerdings ist auch eine Kopplung mit Notbremsfunktionen denkbar.

⁴Z. B. durch eine digitale Karte in Kombination mit der Lokalisationsgenauigkeit eines serienmäßigen Navigationssystems (Positionsgenauigkeit $< 20 \text{ m}$).

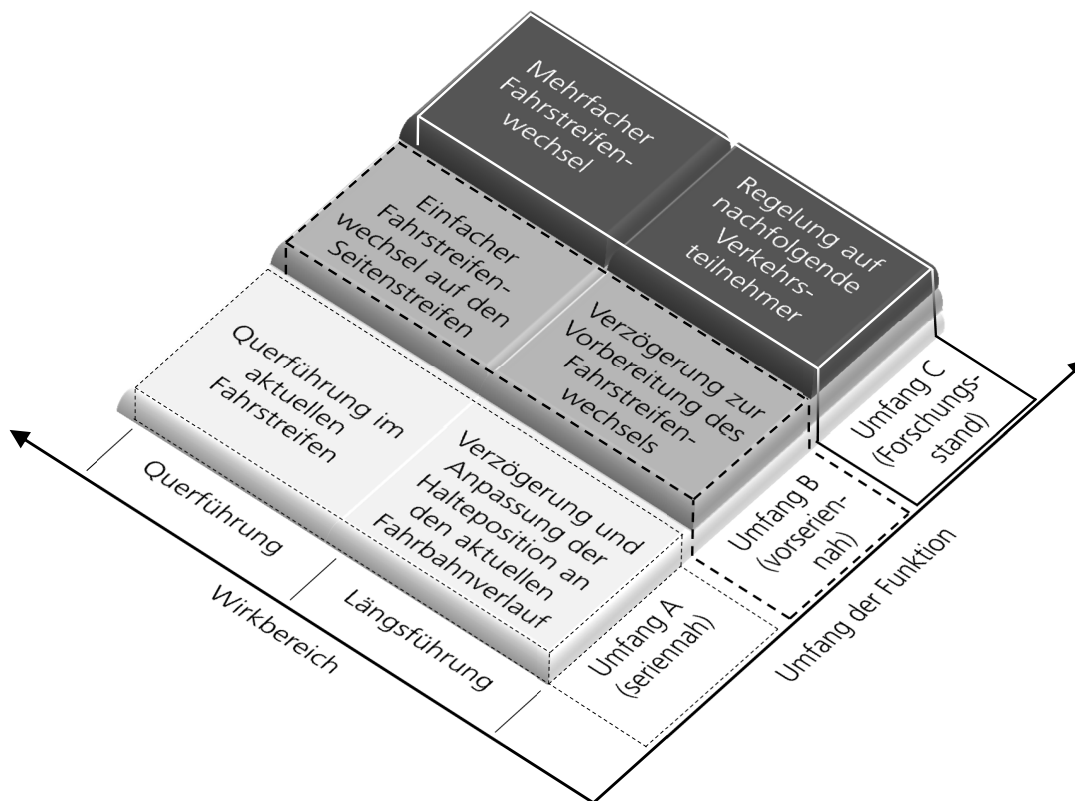


Abbildung 3-1: Einteilung der Funktion hinsichtlich Umfang und Wirkungsbereich

Sensoren sichergestellt, so dass ein Fahrstreifenwechsel ermöglicht wird. Stehende oder langsame Objekte werden auf dem Seitenstreifen erkannt (Pannenfahrzeug, Brückenpfeiler) und der Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels durch die Wahl einer geeigneten Verzögerung angepasst.

Der dritte Funktionsumfang (Umfang C) beinhaltet alle Anforderungen, die in Kap. 3.1 hinsichtlich der Betriebsgefahr betrachtet wurden. Das Fahrzeug führt mehrere Fahrstreifenwechsel durch, um auf den Seitenstreifen zu gelangen. Hier werden nicht nur Fahrzeuge vor dem Notfallfahrzeug erkannt, sondern auch Fahrzeuge seitlich daneben und von hinten folgende Fahrzeuge, die evtl. eine höhere Geschwindigkeit aufweisen. Zusätzlich ist es möglich, das Fahrzeug nicht unverzüglich in den Stillstand überführen zu müssen, sondern geeignete Haltepositionen anzufahren. Dies können z. B. das Ende einer Baustelle oder Straßenabschnitte mit Seitenstreifen sein. Hierfür werden vom Fahrzeug fahrstreifenabhängige Mindestgeschwindigkeiten eingehalten. Eine geeignete Warnstrategie informiert umliegende Verkehrsteilnehmer und motiviert sie zu einem kooperativen Verhalten, so dass auch bei einer erhöhten Verkehrsdichte der automatische Fahrstreifenwechsel ermöglicht wird. Eine Kopplung mit anderen Systemen wie Notbremsfunktionen, zukünftigen Ausweichassistenzsystemen oder Car-to-X-Funktionen ist möglich.

3.3 Systemarchitektur einer automatischen Fahrfunktion

Zur Umsetzung der zuvor definierten Funktionsumfänge des NHA im realen Fahrzeug wird eine Systemarchitektur benötigt. Hierfür wird nachfolgend zunächst eine grundlegende Systemarchitektur für automatische Fahrfunktionen vorgestellt, bevor in Kap. 3.4 funktionspezifische Anpassungen erfolgen.

In Abb. 3-2 ist ein Entwurf für die Systemarchitektur einer hoch- und vollautomatischen Fahrfunktion in Anlehnung an bekannte Forschungsergebnisse dargestellt (nach [82][105]). Hierbei wird eine deliberative Ausprägung gewählt, in der die Wahrnehmung, Entscheidung und Ausführung getrennt sind. Im Gegensatz zu verhaltensbasierten Ansätzen wird hierbei eine getrennte Modellierung der Systemelemente angestrebt. Dies führt nach Schröder zu einer besseren Nachvollziehbarkeit und somit zu einer besseren Verifizierbarkeit der Einzelkomponenten, was eine Umsetzung im Realfahrzeug erleichtert [120]. Des Weiteren ist in Abb. 3-2 gekennzeichnet, in welchen Kapiteln einzelne Komponenten für das NHA genauer spezifiziert werden.

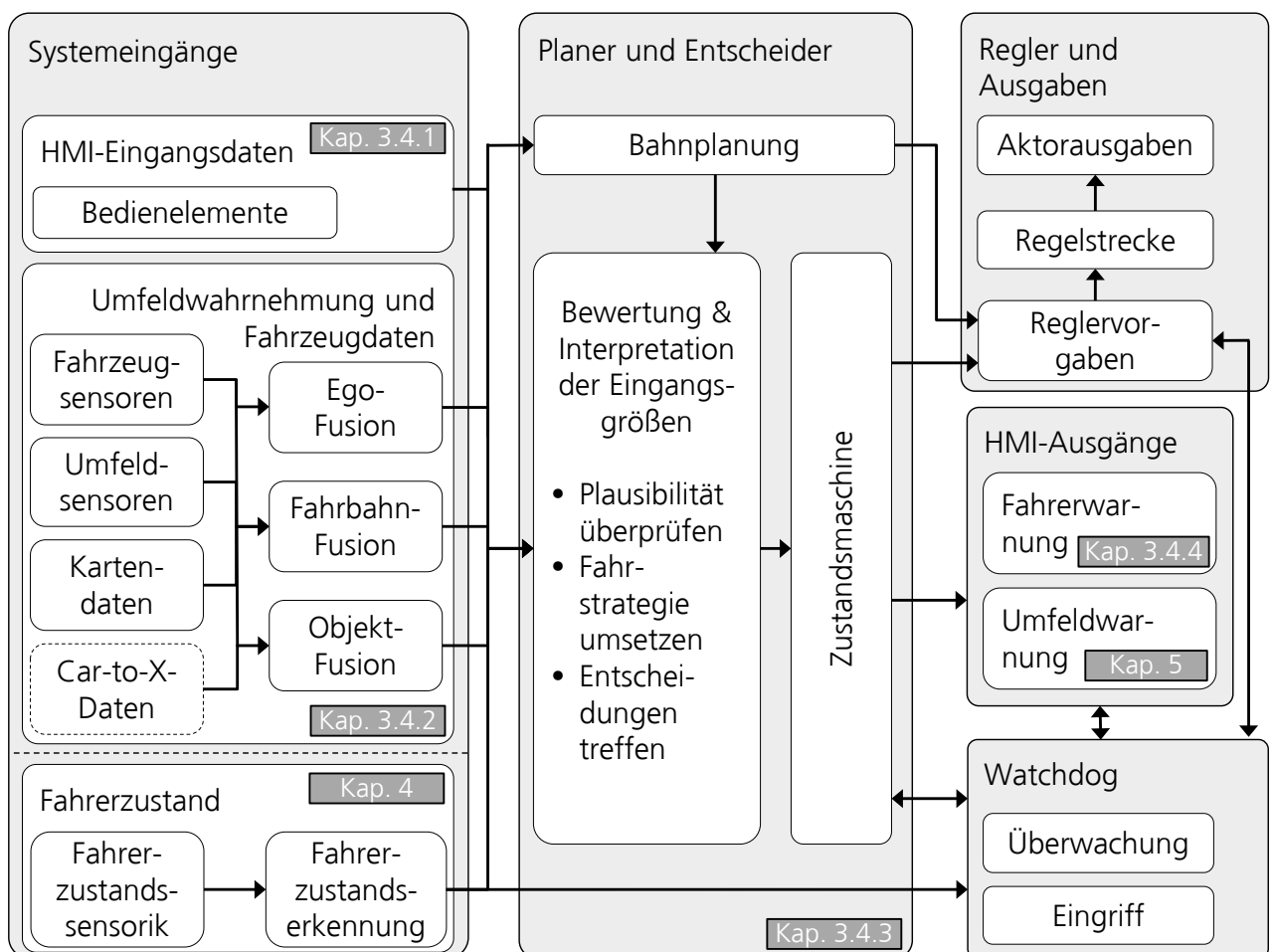


Abbildung 3-2: Systemarchitektur einer automatischen Fahrfunktion (nach [82][105])

Die Grundlage für alle Entscheidungen und Reaktionen eines hochautomatischen Fahrzeugs bilden Eingangsdaten und deren Auswertung. Hierbei wird zwischen manuellen Bedienelemen-

ten, Fahrzeugdaten, Modulen zur Umfeldwahrnehmung und der Fahrerzustandserkennung unterschieden. Die Umfeldwahrnehmung dient zur Lokalisation des Fahrzeugs relativ zu seinem Umfeld sowie zur Erkennung von statischen und bewegten Hindernissen. Als Informationsquelle können u.a. im Fahrzeug verbaute Sensoren (z. B. Raddrehzahlsensoren zur Odometrie), Umfeldsensoren (z. B. Radarsensoren, Bildsensoren, Laser), Kartendaten oder Schnittstellen für eine Kommunikation mit anderen Fahrzeugen oder Infrastrukturen dienen (Car-to-X-Kommunikation). Darüber hinaus gibt es Module zur Interpretation der Sensordaten. Das Ego-Fusions-Modul schätzt den Dynamikzustand des eigenen Fahrzeugs auf Basis von Fahrdynamik- und Odometrie-Informationen. In der Fahrbahn-Fusion wird der Fahrbahnverlauf und Fahrbahnrand um das eigene Fahrzeug geschätzt. Das Objekt-Fusions-Modul schätzt den Zustand sowie die Existenzwahrscheinlichkeit aller durch die Objektsensorik detektierten Objekte [105]. Die Fahrerzustandssensorik überwacht im speziellen Fall des NHA die Fahrfähigkeit des Fahrers.

Der Verarbeitung der Sensordaten erfolgt im Planer-und-Entscheider-Modul. Nach einer Bewertung der Eingangsdaten hinsichtlich ihrer Plausibilität werden anhand einer Systemstrategie Entscheidungen bezüglich der Systemreaktion getroffen, die innerhalb einer Zustandsmaschine umgesetzt werden. Das Modul beinhaltet u.a. die Entscheidungskriterien zur Auswahl eines bestimmten Fahrmanövers für die jeweilige Verkehrssituation. Das Bahnplanungs-Modul berechnet dafür die Trajektorien, die das Fahrzeug zum Erreichen des Zielzustands abfahren kann.

Im Modul „Regler und Ausgaben“ werden die Vorgaben für die Aktuator-Schnittstellen berechnet und anhand von Regelstrecken in Stellgrößen umgerechnet (z. B. Lenkmoment, Sollbeschleunigung).

Im HMI-Ausgänge-Modul erfolgt die Ansteuerung der Warnelemente für den Fahrer und das Umfeld. Neben einer Übernahmeaufforderung vor der Systemaktivierung werden dem Fahrer die aktuellen Systemzustände über Warntöne, Warnsymbole und haptische Feedbacks (z. B. Bremsruck) vermittelt. Andere Verkehrsteilnehmer werden im konkreten Fall des NHA über bevorstehende automatische Fahrmanöver informiert.

Im Watchdog-Modul erfolgen die Überwachung der Systemzustände und eine Aktivierung von Notfallzuständen, wenn Hardware-Komponenten ausfallen oder Software-Entscheidungen unplausibel erscheinen.

3.4 Anpassung der Systemkomponenten für ein NHA und Beispielausprägungen

Zur Umsetzung der verschiedenen Funktionsumfänge und Anforderungen für ein NHA werden nachfolgend einzelne Komponenten der Systemarchitektur genauer spezifiziert. Hierfür werden insbesondere die Umfeldwahrnehmung, Situationsinterpretation (Planer und Entscheider) und das HMI betrachtet und Beispielausprägungen für diese Komponenten aufgezeigt.

Die Fahrerzustandssensorik detektiert im speziellen Fall des NHA die Fahrunfähigkeit des Fahrers. Sie wird gesondert in Kap. 4 betrachtet. Die Warnung von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern durch die Ansteuerung der Fahrzeugrückleuchten in Kombination mit speziellen Fahrmanövern wird ebenfalls in einem eigenständigen Kapitel untersucht (Kap. 5).

3.4.1 Bedienelement zur Aktivierung des NHA

Da einige medizinische Notfälle voraussichtlich nicht zu einer sofortigen Fahrunfähigkeit führen werden, ist ein Bedienelement zur manuellen Aktivierung des Systems erforderlich (Anforderung aus Kap. 2.3).

Bei der Auswahl des geeigneten Bedienelements ist zu berücksichtigen, dass es intuitiv bedienbar ist, da sich aufgrund der Seltenheit der Ereignisse voraussichtlich kein Lerneffekt zur manuellen Bedienung des Systems einstellen wird. Somit erscheint eine Platzierung in der Nähe von anderen Warnelementen sinnvoll (z. B. neben dem Bedienelement für das Warnblinklicht). Eine zentrale Position in der Mittelkonsole ist außerdem vorteilhaft, weil so auch eine Aktivierung von der Beifahrerseite aus möglich ist.

Eine weitere Anforderung an das Bedienelement ist die Absicherung gegen eine versehentliche Aktivierung. Hierfür ist eine zweistufige Aktivierung mit Feedback an den Fahrer denkbar, so dass nach der Aktivierung der ersten Stufe ein akustisches und visuelles Feedback erfolgt. Somit wird der Fahrer vor der tatsächlichen Aktivierung über die bevorstehende Handlung informiert.

In Abb. 3-3 ist ein Beispielentwurf für ein Bedienelement zur Aktivierung des NHA dargestellt. Das Konzept besteht aus einem Rahmen, der um den Druckknopf des Warnblinklichts angeordnet ist. Die erste Stufe wird durch eine Druckbewegung auf den Rahmen aktiviert, so dass dieser in die erste Stufe ausgeklappt wird. Gleichzeitig werden der Rahmen und ein Schriftzug (z. B. „Pull to activate“) beleuchtet, die Beleuchtung des Warnblinklichts wird deaktiviert und es erfolgt ein Warnton. Das NHA wird letztendlich durch das Herunterziehen des Rahmens aktiviert (Stufe 2), was kohärent mit der folgenden Geschwindigkeitsreduktion nach der Aktivierung des Systems ist. Es erfolgt ein visuelles Feedback im Kombiinstrument (vgl. Kap. 3.4.4) samt Warnton. Die Kombination aus Druckknopf (Stufe 1) und Umfassungsgriff (Stufe 2) sorgt dafür, dass das Bedienelement sowohl mit Handschuhen als auch mit eingeschränkten motorischen Fähigkeiten, die mit medizinischen Notfällen einhergehen können, bedienbar ist.

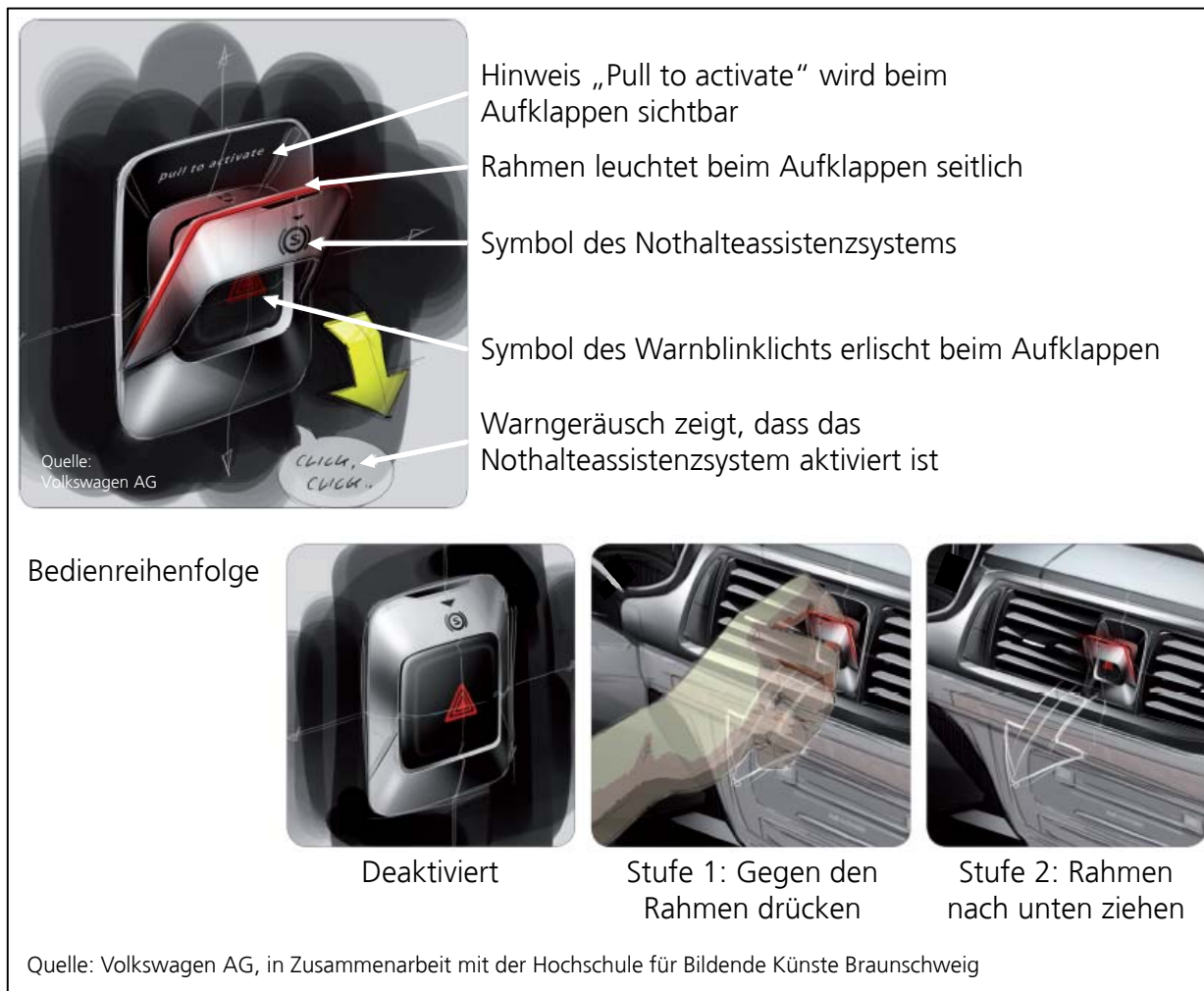


Abbildung 3-3: Konzept des Bedienelements zur Aktivierung des NHA

3.4.2 Umfeldwahrnehmung

Nachdem in Kap. 3.2 mögliche Funktionsumfänge eines NHA vorgestellt wurden, werden nachfolgend Umfeldsensorkonzepte zu deren Umsetzung betrachtet. Hierbei wird der Fokus auf die Erkennung der befahrbaren Fläche (Fahrbahnerkennung) und der Erkennung von Hindernissen (Objekt-Fusion) gelegt. In Tab. 3-1 sind die Anforderungen an die Umfeldsensoren in den einzelnen Ausprägungsstufen dargestellt.

Für die Markteinführung eines NHA sind im Gegensatz zu komfortorientierten hoch- und voll-automatischen Fahrfunktionen geringere Hürden bzgl. der Systemfreigabe zu erwarten (vgl. Kap. 2). Aus diesem Grund bietet sich eine Überprüfung hinsichtlich der Verwendbarkeit oder Integration von serienmäßigen und seriennahen Sensortechnologien an. Diese ermöglichen eine Vielzahl von Kombination zur Abdeckung der Anforderungen an die Umfelderkennung in den einzelnen Funktionsumfängen. Nachfolgend wird eine Übersicht über mögliche Sensoren gegeben, die im Anschluss zu Sensorsets zur Abdeckung der einzelnen Systemumfänge zusammengestellt werden (In Anlehnung an [81]).

	Funktionsumfang A	Funktionsumfang B (zusätzlich zu A)	Funktionsumfang C (zusätzlich zu B)
Fahrbahn- Erkennung	- Markierungen und Verlauf des eigenen Fahrstreifens	- Markierungen und Verlauf des angrenzenden Seitenstreifens	- Markierungen und Verlauf der Nachbarfahrstreifen - Baustellen
Objekt- Erkennung	- Fahrzeuge und Hindernisse auf dem eigenen Fahr- streifen (vor dem Notfallfahrzeug)	- Hindernisse auf dem Seitenstreifen (vor dem Notfallfahrzeug)	- Fahrzeuge und Hinder- nisse auf den Nachfahr- streifen (vor, seitlich neben und hinter dem Notfall- fahrzeug)

Tabelle 3-1: Anforderungen an die Umfeldsensoren für drei Funktionsumfänge des NHA

Seriennahe Umfeldsensortechnologien

In serienmäßigen Assistenzsystemen haben sich **Radarsensoren** zur Messung von Relativpositionen und -geschwindigkeiten bewegter Objekte etabliert. Sie werden im Frontbereich u.a. für automatische Notbremsfunktionen und Abstandsregeltempomaten (ACC) verwendet. Im seitlichen Heckbereich werden Nahbereichsradare zur Fahrstreifenwechselassistentz verwendet. Hierbei werden Frequenzverschiebungen von modulierten elektromagnetischen Wellen gemessen, die durch Abstände und Relativbewegungen zwischen einem Sender und einem Empfänger entstehen [146]. Durch Fernbereichsradare lassen sich insbesondere Objekte mit einem hohen Radarquerschnitt, wie z. B. metallische Objekte, detektieren. Dies ist unabhängig von der Umgebungshelligkeit und bei aktuellen Radarsensoren bis zu einer Reichweite von ca. 250 m möglich [115]. Die korrekte Interpretation von stehenden Objekten ist aufgrund einer begrenzten lateralen Auflösung von Radarsensoren deutlich schwieriger. In Forschungsarbeiten können unter idealen Randbedingungen ähnliche Reichweiten wie für bewegte Objekte erzielt werden. In Seriensystemen werden stehende Ziele allerdings größtenteils herausgefiltert, um Fehlassoziationen mit Randbebauungen und anderen Scheinobjekten zu vermeiden. Zur Erkennung von Fußgängern und Radfahrern per Radar bestehen erste Ansätze, allerdings ist eine Fusion mit weiteren Sensoren wie z. B. Bildsensoren vorteilhaft.

Die Objekterkennung per **Lidar** (Light detection and ranging) basiert auf der Messung von Laufzeiten von elektromagnetischen Wellen, die von Objekten reflektiert werden. Im Gegensatz zu Radarsensoren werden bei Lidar-Systemen nicht Mikrowellen, sondern Ultraviolett-, Infrarot- oder Strahlen aus dem sichtbaren Lichtbereich genutzt. Durch die geringere Wellenlänge von Infrarotlicht ist im Vergleich zu Radarsensoren eine bessere Fokussierung und somit eine höhere laterale Auflösung möglich, allerdings ist das optische Verfahren störanfällig gegenüber Witterungseinflüssen [146][32]. Der Sensorkegel eines Beispielsensors weist einen Öffnungswinkel nahe 60° auf und ermöglicht eine Reichweite von bis zu 200 m. Im Fahrzeug integrierte Laserscanner mit beweglichen Spiegelementen ermöglichen Öffnungswinkel von bis zu 180°,

wobei bei diesen Sensoren die Kostenvorteile gegenüber Radarsensoren durch die mechanisch beweglichen Komponenten entfallen [125].

Ultraschallsensoren werden in automobilen Anwendungen hauptsächlich für ultraschallbasierte Einparkhilfen eingesetzt [97]. Allerdings existieren auch Ansätze zur Überwachung von Seitenbereichen während eines Fahrstreifenwechsels [116]. Hierbei werden Schallimpulse durch vorwiegend piezokeramische Elemente erzeugt und auf Basis einer elektronischen Zeitmessung zwischen dem Start eines Sendeimpulses und dem Eintreffen des zurückkehrenden Echosignals die Entfernung zu Hindernissen gemessen [146]. Durch die hohe Signaldämpfung von Schallwellen ist die Reichweite der Sensoren auf 5-10 m beschränkt. Eine laterale Unterscheidung zwischen Objekten gleichen Abstands ist Prinzip bedingt nur mit mehreren Sensoren möglich.

Bei **Bildsensoren** werden aus Lichtmustern mittels Bildauswerteverfahren und Modellannahmen sekundäre Messgrößen, wie z. B. die Position und die Größe von Objekten extrahiert. Objektgeschwindigkeiten sind dadurch nicht direkt messbar, können aber mittels Trackingverfahren aus dem zeitlichen Verlauf der Bilder berechnet werden [146]. Sie liefern Assistenzsystemen wie z. B. Spurhalteassistenten oder Frontalkollisionsschutzsystemen Informationen über die Lage und Entfernung von anderen Verkehrsteilnehmern oder Fahrstreifenmarkierungen [146]. Zur Messung von 3D-Informationen werden entweder zwei bildgebende Einheiten verwendet (Stereoskopie) oder Ansätze verfolgt, bei denen die Tiefeninformationen anhand der Bewegung von Objekten mit einer einzigen Kamera (Optischer Fluss) berechnen werden [111]. Videobasierte Systeme sind auf eine ausreichende Helligkeit angewiesen und können aufgrund von schlechten Witterungsverhältnissen (Regen, Schnee) in ihrer Objekterkennungsweite eingeschränkt werden. Aktuelle Systeme ermöglichen eine Objekterkennung bis zu Reichweiten von 150 m. Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs verringern den effektiven Öffnungswinkel des Sensors, diese können allerdings durch eine dynamische Ebenenschätzung bis zu einem bestimmten Maß kompensiert werden.

Eine auf der Lichtlaufzeit (Time-of-Flight) basierende Weiterentwicklung von Bildsensoren sind **PMD-Sensoren** (Photonic Mixer Device). Hierbei werden bereits in den einzelnen Pixel einer Empfangsoptik die modulierten optischen Signale mit der Laufzeit des Lichts korreliert, das von einem separaten LED-Array (Light-emitting diode) emittiert wird. Als Ergebnis wird ein Bild mit Tiefeninformationen erstellt, aus dem Entfernungen und die Größe von Objekten bis zu einer Distanz von 50 m ermittelt werden können. Im Vergleich zu normalen Bildsensoren bieten PMD-Sensoren bei Dunkelheit bessere Messergebnisse, allerdings sind sie empfindlicher gegenüber Fremdlicht, wie z.B. durch Sonneneinstrahlung [146].

In Tab. 3-2 sind die Eigenschaften der einzelnen Sensorkonzepte zusammengefasst. Außerdem wird anhand von Stärken und Schwächen aufgezeigt, welche Bereiche der Umfeldwahrnehmung sich durch die Sensoren im Hinblick auf NHA abdecken lassen.

	Radar	Lidar	Ultraschall	Bildsensor	PMD
Effektive Reichweite	< 250m	< 200m	< 10m	< 150m	< 50m
Stärken	Stehende/bewegte Objekte	Stehende/bewegte Objekte	Stehende Objekte (Nahbereich)	Konturen	Stehende/bewegte Objekte
Schwächen	Laterale Auflösung	Wettereinflüsse (Nebel, Schnee)	Reichweite	Bewegte Objekte, Wettereinflüsse (Nebel, Schnee)	Wettereinflüsse (Nebel, Schnee), Reichweite
Primärer Nutzen für ein NHA	<ul style="list-style-type: none"> - Stehende/bewegte Fahrzeuge/Objekte - Fußgänger - Leitplanken 	<ul style="list-style-type: none"> - Stehende/bewegte Fahrzeuge/Objekte - Fußgänger - Leitplanken 	<ul style="list-style-type: none"> - Absicherung Fahrstreifenwechsel - Leitplanken 	<ul style="list-style-type: none"> - Stehende Fahrzeuge/Objekte - Fußgänger - Konturen (Leitplanken, Fahrstreifen, Verkehrszeichen) 	<ul style="list-style-type: none"> - Stehende/bewegte Fahrzeuge/Objekte - Fußgänger

Tabelle 3-2: Vergleich seriennaher Sensortechnologien für NHA

Sensorkonfigurationen für Funktionsumfänge

Im Folgenden werden mögliche Sensorkonfigurationen diskutiert, die die in Tab. 3-1 definierten Anforderungen für die drei vorgestellten Ausbaustufen eines NHA mit unterschiedlicher Güte abdecken. Die aufgezeigten Konzepte unterscheiden sich in ihrer Leistungsfähigkeit und der damit verbundenen Systemkomplexität. Abschließend wird ein Set vorgestellt, das die Anforderungen unter Beachtung von wirtschaftlichen Aspekten hinreichend erfüllt.

In Abb. 3-4 ist eine mögliche Sensorkonfiguration für den Funktionsumfang A⁵ dargestellt. Als einfachste Variante ist die Verwendung einer Mono-Kamera denkbar (links), was der Umfeldsensorik eines Spurhalteassistenzsystems entspricht. Damit ist eine Erkennung der Fahrstreifenmarkierungen für eine Spurmittenführung möglich. Andere Fahrzeuge werden bis zu einer Distanz von ca. 150 m erkannt [112], was einer oberen Grenzggeschwindigkeit von $v_{\max} \approx 110 \text{ km/h}^6$ entspricht. Somit ist die Verwendung dieser Konfiguration für den Stadtverkehr und Überlandstraßen möglich. Eine zusätzliche Erweiterung des Systems um eine GPS-basierte Lokalisation kann für eine Optimierung der Halteposition entlang des Fahrbahnverlaufs verwendet werden. In der Mitte von Abb. 3-4 ist eine Erweiterung um einen Fernbereichsradar⁷ sowie eine Stereo-Kamera dargestellt. Per Radar können Objekte bis zu einer Distanz von ca. 250 m erkannt werden. Dies entspricht einer Maximalgeschwindigkeit von $v_{\max} \approx 140 \text{ km/h}^8$ zur Erkennung eines Stauendes auf einer Autobahn. Allerdings ist die Qualität der Ergebnisse stark von

⁵Im aktuellen Fahrstreifen bis in den Stillstand abbremsen.

⁶Für eine angenommene Grenzggeschwindigkeit $v_{\max} = \sqrt{2|a_{\max}|S}$, mit einer Beschleunigung $a_{\max} = -3 \text{ m/s}^2$ und einer Sensorreichweite $S = 150 \text{ m}$ (Abgeleitet aus der Näherung für den Anhalteweg $S = \frac{1}{2} (v_{\max}^2/|a_{\max}|)$, ohne Latenzzeiten der Sensoren, ohne Verzögerungen im Bremsdruckaufbau).

⁷Long Range Radar (LRR).

⁸ $v_{\max} = \sqrt{2|a_{\max}|S}$, mit $a_{\max} = -3 \text{ m/s}^2$, $S = 250 \text{ m}$.

der Assoziation des Zielobjekts mit einem Zielfahstreifen abhängig, die wiederum stark von der Erkennung des Fahstreifens beeinflusst wird. Eine Stereo-Kamera kann verwendet werden, um Redundanzen bzgl. der Objektinformationen zu liefern. Ein Lidar-Sensor verbessert die laterale Unterscheidbarkeit zwischen Objekten und erreicht Reichweiten von bis zu 200 m ($v_{\max} \approx 125 \text{ km/h}^9$). Außerdem weist er bei Helligkeitsschwankungen eine bessere Leistungsfähigkeit als kamerabasierte Verfahren auf (Abb. 3-4, rechts).

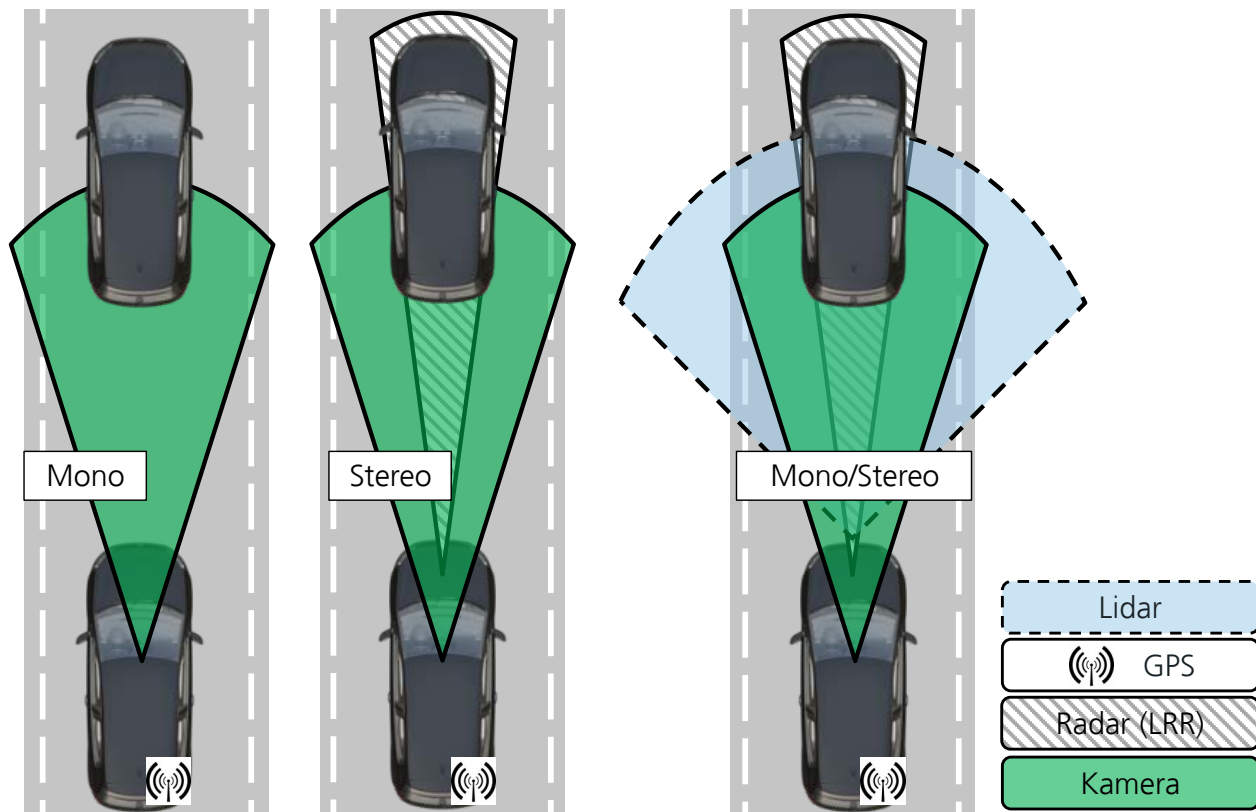


Abbildung 3-4: Sensorkonzepte für Funktionsumfang A (in Anlehnung an [81])

Wie zuvor angesprochen, kann sich die geringe Auftretenswahrscheinlichkeit eines medizinischen Notfalls allerdings bei der Auswahl der Sensoren für ein NHA positiv auf die ASIL-Einstufung der Systemkomponenten auswirken. Somit ist es denkbar, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit der Verknüpfung aus einem medizinischen Notfall und einem zu diesem Zeitpunkt auftretenden Stauende (was die Detektion von stehenden Fahrzeugen notwendig macht) zu gering ist und zunächst nicht vom System abgedeckt werden muss. Dadurch ist es denkbar, das System zunächst mit einer Kombination aus Mono-Kamera und Fernbereichsradar umzusetzen.

Für Funktionsumfang B¹⁰ ist zusätzlich eine Erfassung des Seitenstreifens (inkl. möglicher Hindernisse) neben dem Notfallfahrzeug notwendig (vgl. Abb. 3-5). Ausgehend von der zuvor bestimmten Sensorkonfiguration für den Frontbereich (Fernbereichsradar + Mono-Kamera) ist

⁹ $v_{\max} = \sqrt{2|a_{\max}|S}$, mit $a_{\max} = -3 \text{ m/s}^2$, $S = 200 \text{ m}$.

¹⁰Zusätzlich zu Umfang A: Fahstreifenwechsel auf den Seitenstreifen.

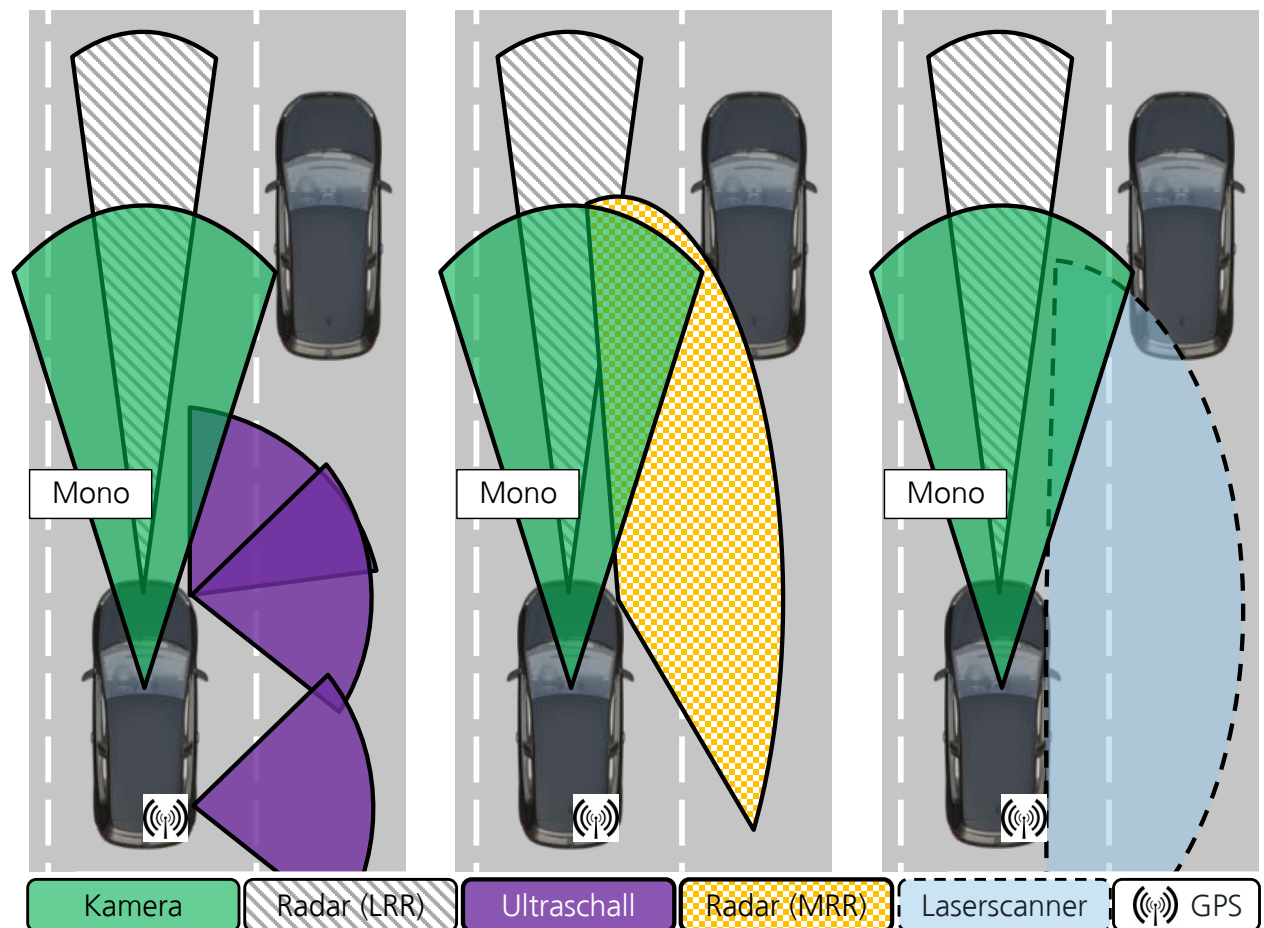


Abbildung 3-5: Sensorkonzepte für Funktionsumfang B (in Anlehnung an [81])

eine Erkennung des Seitenstreifens theoretisch möglich. Bei einem Öffnungswinkel von 50° einer Mono-Kamera [78] werden die Fahrstreifenmarkierungen des benachbarten Seitenstreifens erkannt. Für den Fall, dass keine Markierungen vorhanden sind, existieren Forschungsansätze, bei denen die Fahrbahn­ränder geschätzt werden. Dies lässt sich z. B. durch eine radarbasierte Schätzung der Leitplankenverlaufs oder durch kamerabasierte Schätzungen der Fahrbahn­ränder anhand von Leitpfosten, Leitborden oder Randsteinen erzielen [132]. Die Erkennung von Fahrzeugen auf dem Seitenstreifen ist somit für Distanzen $\geq 8\text{ m}^{11}$ vor dem Fahrzeug möglich. Für den direkten Seitenbereich des Fahrzeugs ist eine Fusion mit den Signalen der Ultraschallsensoren der Einparkhilfe denkbar [116], allerdings ergeben sich mit zunehmender Geschwindigkeit Einschränkungen durch Fehlreflektionen (z. B. durch Leitplanken). Eine höhere Robustheit zur Detektion von bewegten Objekten und stationären Hindernissen im Seitenbereich ist durch Radarsensoren im Nahbereich¹² möglich (Abb. 3-5, Mitte). Sie werden bereits in Systemen zur Fahrstreifenwechselassistent im seitlichen Heckbereich verbaut (Öffnungswinkel bis zu 150°). Alternativ ist auch die Verwendung von Frontradaren mit einer elektronischen Keulenverstellung (Receive digital beamforming) denkbar, die simultan eine Abdeckung mit großer Reichweite (bis zu 200 m) und einem großen Öffnungswinkel (bis zu 90°) im Nahbereich ermöglichen. Eine komplette Beobachtung des Seitenbereichs lässt sich durch Laserscanner erzielen, wobei

¹¹Annahmen: Öffnungswinkel der Kamera $\alpha = 50^\circ$, Fahrstreifenbreite $b_{FS} = 3,75\text{ m}$.

¹²Mid Range Radar (MRR).

diese Systeme zum derzeitigen Stand neben den wirtschaftlichen Aspekten Nachteile bei der Integrierbarkeit aufweisen (Abb. 3-5, rechts).

Zur Durchführung von mehreren Fahrstreifenwechseln in Funktionsumfang C wird eine Erkennung von neben oder hinter dem Notfallfahrzeug fahrenden Verkehrsteilnehmern benötigt. Im einfachsten Fall ist eine Belegungserkennung des Nachbarfahrstreifens mit Ultraschallsensoren denkbar (Abb. 3-6, links). Durch die geringe Sensorreichweite der Ultraschallsensoren ($\leq 10\text{ m}$) werden nachfolgende Verkehrsteilnehmern mit hohen Relativgeschwindigkeiten allerdings spät erkannt. Bessere Ergebnisse lassen sich mit Nahbereichsradaren (MRR) erzielen (Abb. 3-6, rechts), die bereits serienmäßig zur Fahrstreifenwechselassistenten eingesetzt werden und nachfolgende Fahrzeuge bis zu einer Distanz von 150 m detektieren [146]. Zusätzlich ist es denkbar, diese Sensoren ebenfalls zur Überwachung des nachfolgenden Verkehrs zu verwenden, nachdem das Notfallfahrzeug in den Stillstand überführt wurde. Für den Fall einer drohenden Heckkollision eines nachfolgenden Fahrzeugs mit dem Notfallfahrzeug können die Unfallfolgen bspw. durch aktive Kopfstützen und eine Aktivierung der Gurtstraffer verringert werden [8].

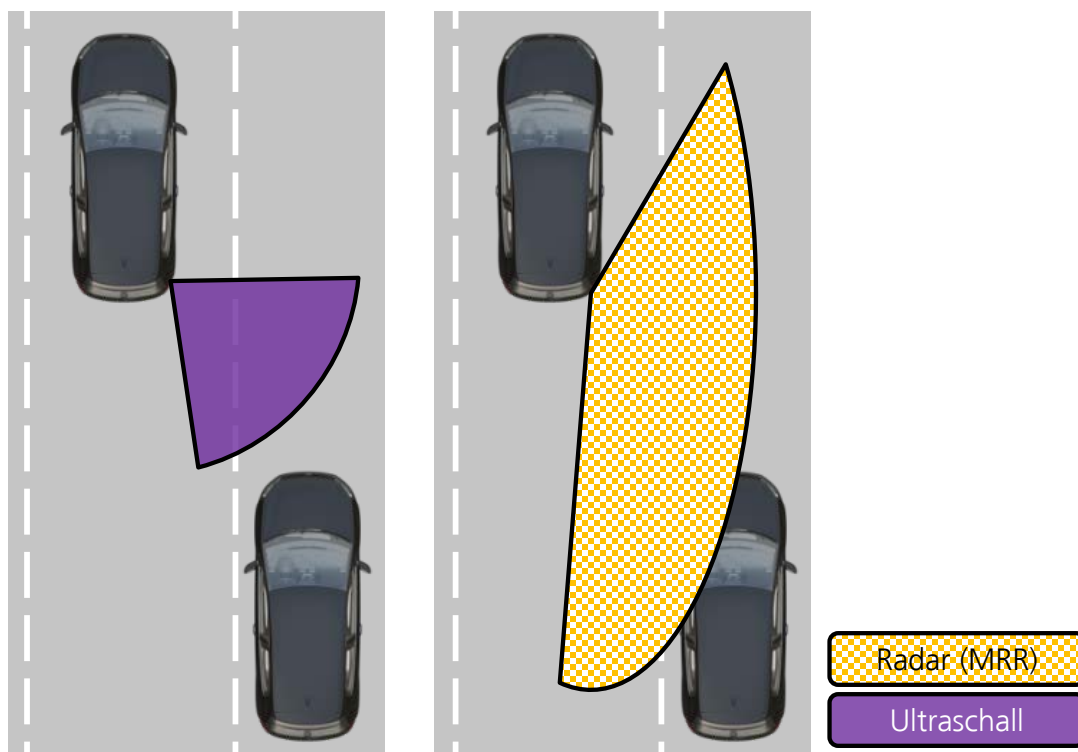


Abbildung 3-6: Sensorkonzepte für Funktionsumfang C (in Anlehnung an [81])

Abschließend ist in Abb. 3-7 eine Sensorkonfiguration dargestellt, die eine Abdeckung der Fahrmanöver nach Funktionsumfang C bietet. In einer detaillierteren Folgebetrachtung gilt es zu überprüfen, ob der vordere Seitenbereich durch die Frontkamera und die hinteren Nahbereichsradare hinreichend abgedeckt werden, so dass auf die vorderen Nahbereichsradare verzichtet werden kann. Durch geeignete Trackingverfahren können zudem seitliche Fahrzeu-

ge plausibilisiert werden, so dass eine Belegungserkennung durch Ultraschallsensoren möglich ist.

In der Literatur finden sich ähnliche Konfigurationen für Nothalteassistenzsysteme [63], wobei bei dieser Sensoranordnung ein Fokus auf die Verwendung von seriennaher Umfeldsensortechnik gelegt wird, die in ihrem Sensorumfang und den Wahrnehmungsalgorithmen zur Erkennung von Sondersituationen (z. B. Baustellen, unbefestigte Straßen, Parkplätze) erweiterbar ist. Durch die Überlappungen einiger Sensorsichtbereiche vor und hinter dem Fahrzeug ergeben sich Redundanzen in der Umfeldwahrnehmung. Die benötigten Redundanzen bei Sensorausfällen gilt es allerdings im Rahmen einer ASIL-Bewertung zu spezifizieren. Die Verwendung von Car-to-X-Kommunikation bietet eine Erweiterungsmöglichkeit zur frühzeitigen Warnung nachfolgender Verkehrsteilnehmer.

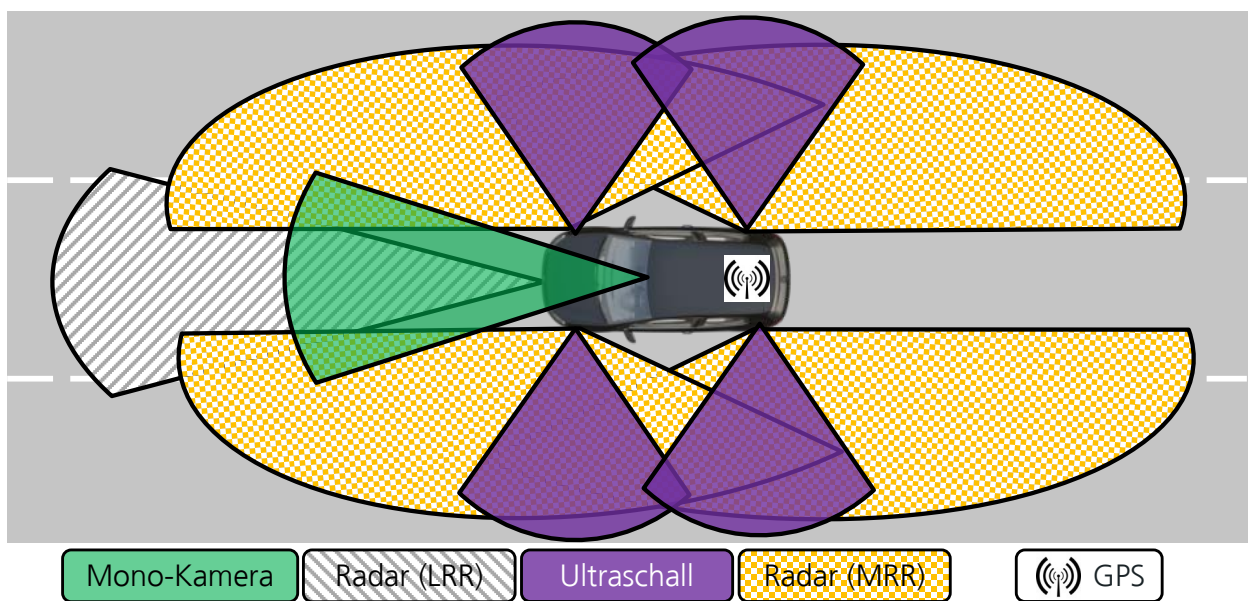


Abbildung 3-7: Seriennahe Sensorkonfiguration für ein Nothalteassistenzsystem (nach [81])

3.4.3 Planer und Entscheider

Nach Schröder eignen sich mehrere Verfahren zur Wissensmodellierung und Entscheidungsfindung für automatisierte Fahrfunktionen [120]. Zustandsmaschinen¹³ eignen sich zur Beschreibung von Beziehungen zwischen diskreten und logisch miteinander verknüpften Zuständen. Petri-Netze stellen eine Verallgemeinerung der Automatentheorie dar und sind zusätzlich in der Lage, parallele und zeitabhängige Prozesse abzubilden. Zur Darstellung von nicht exakt mathematisch modellierbarem Wissen eignen sich Fuzzy-Logiken. Zum Anlernen von statistisch unsicherem Wissen eignen sich z. B. Bayes'sche und neuronale Netze.

¹³In der Literatur werden synonym auch folgende Begriffe verwendet: Endliche Automaten, Zustandsautomaten, Finite State Machine (FSM).

Aufgrund der deterministischen Darstellbarkeit der Entscheider-Logik eines NHA wird eine Zustandsmaschine verwendet, in der interpretierte und bewertete Informationen zu Transitionen (T) zwischen den diskreten Zuständen (Z) führen, was wiederum einen Einfluss auf die Ansteuerung der Aktuator-Schnittstellen und des HMI hat. Nachfolgend werden die Zustandsmaschine sowie die Eingangsgrößen beschrieben, die die Zustandsänderungen bedingen. Das System wird für den Funktionsumfang C (vgl. Abb. 3-1) ausgelegt und ist für Funktionsumfänge mit weniger Situationsdifferentiation (Funktionsumfänge A+B) anpassbar. Im Anschluss daran wird rudimentär das Bahnplanungs-Modul beschrieben, das Möglichkeiten für Fahrstreifenwechsel zwischen andere Verkehrsteilnehmer identifiziert und die Trajektorie des Notfallfahrzeugs plant.

Zustandsmaschine

Die Zustandsmaschine des NHA ist in Abb. 3-8 dargestellt. Liegt kein medizinischer Notfall vor, befindet sich das System im **Zustand 1**.

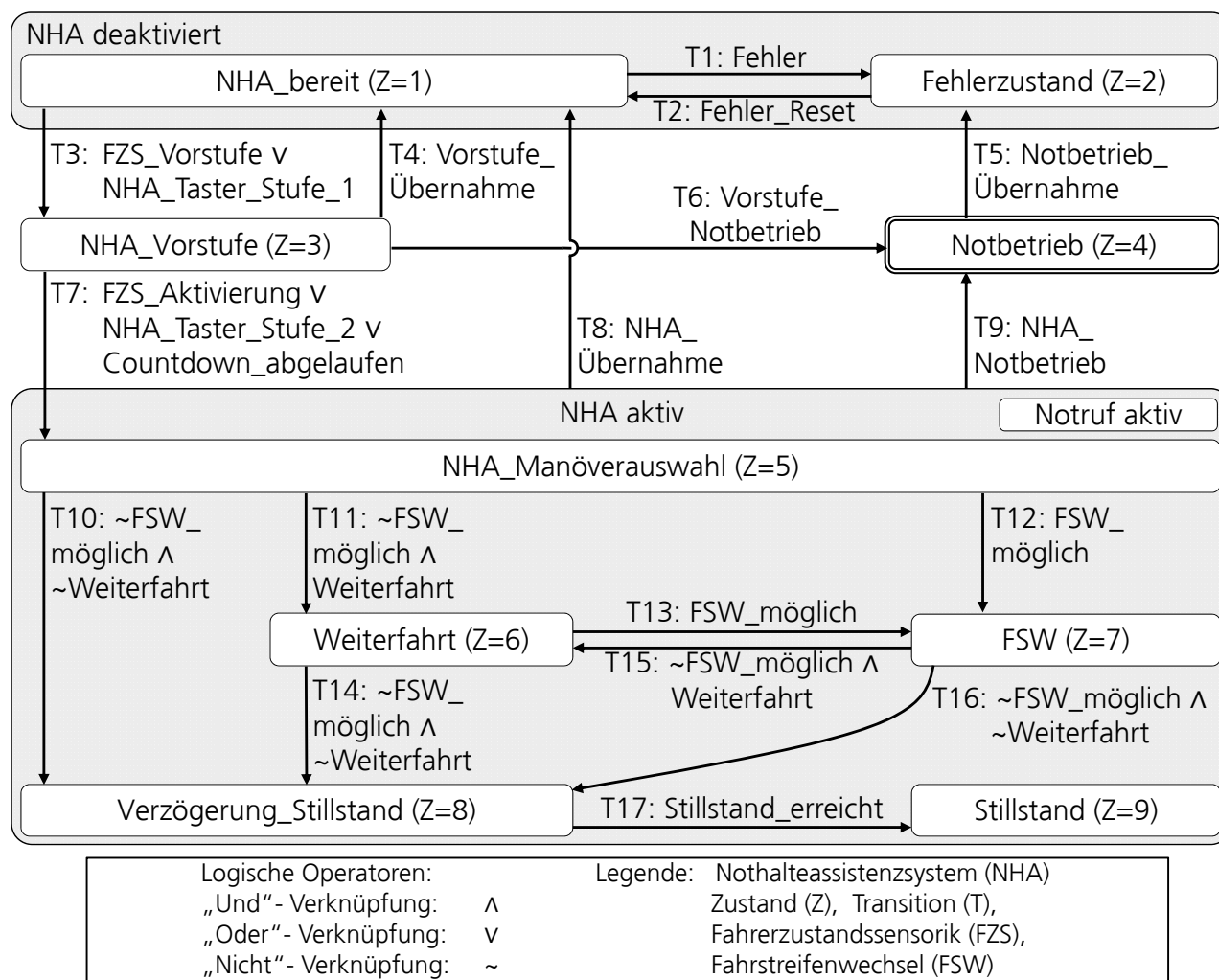


Abbildung 3-8: Zustandsmaschine des Nothalteassistentensystems

Sobald ein technisches Problem vorliegt, das zu einer Einschränkung im Betrieb des NHA führen kann, wird das System durch die **Transition 1** in den **Zustand 2** überführt und der Fahrer wird

über ein Warnsymbol im Kombiinstrument informiert. Dies kann z. B. der Fall sein, wenn Umfeldsensoren verschmutzt sind oder ein Problem bei der Ansteuerung der Aktuatoren (Lenkung, Bremse) besteht. Das System ist erst wieder aktivierbar, nachdem der Fehler behoben wurde (**Transition 2**).

Da bei einer sensorischen Erkennung von medizinischen Notfällen mittels Fahrerzustandssensorik (FZS) Messungenauigkeiten zu Fehlauflösungen führen können, ist vor der eigentlichen Aktivierung des Systems eine eskalierende Vorstufe denkbar. Die Vorstufe des NHA (**Zustand 3**) wird aktiviert, sobald die **Transition 3**¹⁴ schaltet. Neben der Auslösung durch die Fahrerzustandssensorik (FZS_Vorstufe) wird dieser Zustand auch bei der Überführung des manuellen Bedienelements in Stufe 1 (NHA_Taster_Stufe_1) aktiviert (vgl. Kap. 3.4.1). Durch Zustand 3 werden die Fahrzeugquerführung im Fahrstreifen und eine automatische Abstandregelung aktiviert. Außerdem wird das Fahrzeug auf die in Kap. 3.1 beschriebenen Mindestgeschwindigkeiten verzögert, die je nach Fahrbahn und Fahrstreifen variieren können. Das NHA wird letztendlich bei einer fehlenden Übernahme des Fahrers aufgrund der detektierten Fahrunfähigkeit (FZS_Aktivierung) vollständig aktiviert (**Transition 7**). Die Aktivierung erfolgt ebenfalls bei einer Überführung des Bedienelements in Stufe 2 (NHA_Taster_Stufe_2). Mithilfe eines Countdowns wird vermieden, dass das Fahrzeug in Zustand 3 verbleibt, wenn der Fahrer Stufe 2 des Bedienelements evtl. nicht mehr eigenständig aktivieren kann (Countdown_abgelaufen). Eine Deaktivierung von Zustand 3 ist durch die Rückstellung des Bedienelements in die Ausgangsposition sowie durch einen Lenkeingriff, Bremseingriff oder das Übertreten des Gaspedals („Kick-Down“) durch den Fahrer möglich (**Transition 4**).¹⁵ Da in Zustand 3 sowohl die Quer- als auch die Längsführung des Systems aktiviert ist, ist der Fehlgebrauch des Systems nicht auszuschließen. Um dies zu vermeiden, ist ein eskalierendes HMI zu wählen, dass den Fahrer durch Warnsymbole und Warntöne zur Übernahme auffordert, für den Fall dass er nicht fahrunfähig ist. Es ist ebenfalls denkbar, ihn durch ein haptisches Feedback (Bremsruck des Fahrzeugs) zu warnen.

Nach der Aktivierung des Systems durch Transition 7 wird in **Zustand 5** für jede Verkehrssituation das passende Fahrmanöver aktiviert. Sobald sich das Fahrzeug auf einer Fahrbahn mit mehreren Fahrstreifen befindet, wird gemäß der Betriebsgefahrenreduktion nach Kap. 3.1 der Seitenstreifen bestmöglich angefahren. Unmittelbar nach der Aktivierung des NHA wird der Fahrer visuell und auditiv über die Betriebssituation informiert. Es ist denkbar, einen Notruf abzusetzen und die Position des Fahrzeugs an eine Verkehrsleitzentrale weiterzuleiten. Außerdem werden gemäß Kap. 5 das Warnblinklicht und ggf. eine Warnstrategie zur Ermöglichung von Fahrstreifenwechseln in dichtem Verkehr aktiviert. Genau wie bei der Vorstufe des NHA kann der Fahrer das System durch Lenkbewegungen, Bremseingriffe und durch die Rückstellung des

¹⁴ „UND“-Verknüpfung: „^“; „ODER“-Verknüpfung: „v“; Negation einer Transition: „~“.

¹⁵ Die Deaktivierung des NHA per Lenk- oder Bremseingriff und „Kick-Down“ orientiert sich an den Übersteuermöglichkeiten von serienmäßigen Fahrerassistenzsystemen. Es gilt zu untersuchen, ob für medizinische Notfälle wie Epilepsien eine differenzierte Abbruchstrategie notwendig ist, um eine versehentliche Deaktivierung des Systems durch krampfartige Bewegungen oder das Zusammensacken des Fahrers über dem Lenkrad zu vermeiden (vgl. Kap. 4).

NHA-Bedienelements deaktivieren (**Transition 8**). Nach der Deaktivierung wird der Notruf unterbrochen oder nach bereits erfolgtem Verbindungsaufbau fortgesetzt.

Sobald ein Fahrstreifenwechsel möglich ist (**Transition 12**), erfolgt eine Ansteuerung der Quer- und Längsführung unter Berücksichtigung der umliegenden Verkehrsteilnehmer (**Zustand 7**). Währenddessen wird der Fahrer über das Fahrmanöver informiert. Die Freigabe zur Durchführung des Fahrstreifenwechsels wird nachfolgend im Bahnplanungsmodul erläutert.

Für den Fall, dass ein Fahrstreifenwechsel in einer Verkehrssituation angestrebt wird, aber durch die aktuelle Verkehrsdichte nicht durchführbar ist (**Transition 11**), verbleibt das Fahrzeug quergeführt im momentanen Fahrstreifen (**Zustand 6**) und wird konstant auf eine Mindestgeschwindigkeit verzögert, die von den Durchschnitts- und Richtgeschwindigkeiten der Fahrbahn abhängig ist. Wenn sich innerhalb einer bestimmten Fahrtzeit die Möglichkeit für einen Fahrstreifenwechsel auf den rechten Nachbarfahrstreifen oder den Seitenstreifen ermöglicht, wird dieser eingeleitet (**Transition 13**). Dieser Zustand wird erneut unmittelbar nach dem absolvierten Fahrstreifenwechsel aktiviert (**Transition 15**), falls ein weiterer Fahrstreifenwechsel geplant ist. Anderenfalls wird durch die **Transition 14** und **16** eine Verzögerung des Fahrzeugs im eigenen Fahrstreifen bis in den Stillstand eingeleitet (**Zustand 8**), wobei hierbei der Fahrbahnverlauf berücksichtigt wird, um bspw. nicht direkt hinter schlecht einsehbaren Kurven oder auf Kreuzungen zu halten. Für Abschnitte, in denen kein Fahrstreifenwechsel möglich ist, wird direkt durch **Transition 10** die Verzögerung in den Stillstand aktiviert (**Zustand 8**), inkl. eines Spurversatzes zur rechten Fahrbahnmarkierung. Dies wird größtenteils auf Landstraßen sowie im städtischen Verkehr der Fall sein.

Sobald der Stillstand des Fahrzeugs erkannt wurde (**Transition 17, Zustand 9**), wird die elektronische Parkbremse des Fahrzeugs aktiviert. Die Zündung des Fahrzeugs wird nicht deaktiviert, um eine möglichst lange Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums zu gewährleisten. Bei Fahrzeugen mit manuellem Schaltgetriebe wird die Klimatisierungseinheit nach dem Abwürgen des Motors durch die Fahrzeugbatterie für eine begrenzte Dauer mit Energie versorgt. Außerdem ist es denkbar, die Fahrzeigtüren zu entriegeln, um die Bergung des möglicherweise bewusstlosen Fahrzeugführers zu vereinfachen.

Für den Fall, dass während der Durchführung eines Nothaltemanövers ein Systemfehler auftritt, wechselt das System in den Notbetrieb (**Zustand 4**). Die Erkennung der Notsituation ist die Aufgabe des Watchdog-Moduls (vgl. Abb. 3-2). Dies kann während des aktivierten NHA (**Transition 9**) und bei der Vorstufe der Fall sein (**Transition 6**). Eine Ursache für Systemfehler kann bspw. ein verschmutzter Sensor zur Umfeldwahrnehmung sein. Für diesen Sonderfall ist die Systemreaktion stark von der Art des Fehlers abhängig. In den meisten Fällen wird ein kontrolliertes Verzögern des Fahrzeugs adäquat sein. Abhängig von der Güte der Fahrstreifen- und Objekterkennung wird das Fahrzeug im eignen Fahrstreifen oder im Nachbarfahrstreifen in den Stillstand überführt. Der Notbetrieb kann genauso wie das NHA vom Fahrer übersteuert und abgebrochen werden. Nach der Deaktivierung wird das System in den Fehlerzustand (**Zustand 4**) überführt und lässt sich zunächst nicht wieder aktivieren (**Transition 5**).

Zunächst nicht berücksichtigt wurde eine Kombination des NHA mit Notbrems- und Notausweichfunktionen, deren Systemeingriff voraussichtlich unabhängig vom Zustand des NHA erfolgt.

Bahnplanung

Im Bahnplanungs-Modul wird die Soll-Trajektorie des Notfallfahrzeugs berechnet, entlang derer das Fahrzeug in den Stillstand überführt wird. Außerdem erfolgt eine Freigabe zur Durchführung von Fahrstreifenwechselmanövern (Transitionen 12 und 13, Abb. 3-8). Hierfür werden insbesondere die Positionsdaten des Fahrzeugs relativ zu seinem Fahrstreifen sowie die Relativabstände und -geschwindigkeiten zu anderen Verkehrsteilnehmern verwendet. Die Ausgangsgrößen sind die Sollgrößen für die Schnittstellen zu den Aktuatoren (insb. das Lenkmoment und die Sollbeschleunigung). Da die Bahnplanungs- und Regelungsalgorithmen nicht im Fokus dieser Arbeit stehen, werden lediglich die für das Verständnis benötigten Eckpunkte des zugrundeliegenden Algorithmus erwähnt, bevor auf die spezifischen Anpassung für das NHA eingegangen wird (in Anlehnung an [52]).

Für die Berechnung der Fahrzeugtrajektorien wird ein Ansatz von Werling verwendet, wonach Trajektorienbündel getrennt für die Längs- und Querbewegung¹⁶ eines Fahrzeugs berechnet und anhand von Kostenfunktionen bewertet werden [138]. Vorteile im Ansatz von Werling ergeben sich gegenüber anderen Bahnplanungsalgorithmen u.a. dadurch, dass eine gleichzeitige Bewertung mehrerer Zielzustände in einem dynamischen Umfeld erfolgen kann. Gleichzeitig lässt sich das gewünschte Fahrzeugverhalten (Anfahren des Seitenstreifens, keine Erhöhung der Fahrzeuggeschwindigkeit) über Kostenfunktionen abbilden.

Die **Grundlage zur Berechnung der Trajektorien** nach Werling bildet die Beschreibung der Fahrzeugbewegung in den sogenannten Frenet-Koordinaten $[n_r, t_r]$ einer Referenzkurve. Diese Referenzkurve wird nachfolgend durch den Verlauf der Fahrstreifenmitte repräsentiert. Die Fahrzeugbewegung wird durch die Querbewegung $d(t)$ und die Längsbewegung $s(t)$ bezüglich der Referenzkurve beschrieben (vgl. Abb. 3-9).

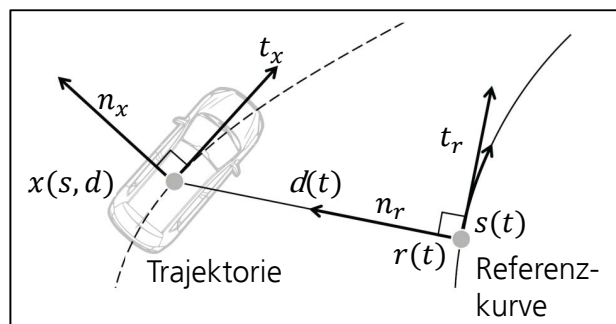


Abbildung 3-9: Trajektoriengenerierung in den Frenet-Koordinaten einer Referenzkurve (aus [138])

¹⁶Die getrennte Betrachtung der Längs- und Querbewegung ist zulässig, da ein NHA ohne Notbrems- und Notausweichfunktionen Längs- und Querbewegungen $< 4 \text{ m/s}^2$ durchführen wird. Dadurch treten vernachlässigbar kleine Wechselwirkungen der zu übertragenden Längs- und Querkraften in der Reifenaufstandsfläche auf.

Bestandteil der Trajektorienberechnung nach Werling ist die Generierung von ruckarmen¹⁷ Trajektorien. Eine komfortable Auslegung der Fahrmanöver steht zwar nicht im Fokus eines NHA, allerdings werden durch ruckarme Trajektorien sprunghafte Anstiege der Steuergrößen vermieden, was zu Fehlern in der Ansteuerung der Aktuatoren führen kann. Aufgrund der komfortablen Auslegung eines NHA lässt sich die Fahrzeugbewegung hinreichend durch die Bewegung einer Punktmasse beschreiben. So wird zunächst getrennt für die Längs- und Querbewegung ein Integratorsystem $f(\xi, u)$ durch

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \xi + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u := f(\xi, u) \quad (3.1)$$

aufgestellt, dessen Ausgänge $\xi_1(t)$ jeweils durch $\xi_1(t) = d(t)$ bzw. $\xi_1(t) = s(t)$ beschrieben werden. Im Zustandsvektor $\xi^T = [\xi_1, \xi_2, \xi_3]$ werden die Ausgänge $\xi_1(t)$ sowie deren zeitliche Ableitungen $\xi_2(t) = \dot{\xi}_1(t)$ und $\xi_3(t) = \dot{\xi}_2(t)$ abgebildet. Durch den Systemeingang $u(t) = \ddot{\xi}_1(t)$ wird jeweils der Ruck $\ddot{d}(t)$ und $\ddot{s}(t)$ dargestellt.

Für die besagte Minimierung des Rucks in Gl. 3.1 wird ein Kostenfunktional erstellt, das den Ruck zwischen einem Anfangszeitpunkt t_0 und einem noch zu wählenden Endzeitpunkt τ (inkl. weiterer Kostenfunktionen $K(\xi(t), t)_\tau$) bewertet:

$$J_\xi = \int_{t_0}^{\tau} f_0(t) dt + (K(\xi(t), t))_\tau, \quad (3.2)$$

$$\text{mit } f_0(t) := \frac{1}{2} u^2(t) \quad (3.3)$$

Somit lässt sich ein Optimalsteuerproblem beschreiben, in dem Gl. 3.3 die Hauptbedingung stellt und in die Bewegungsgleichungen in Gl. 3.1 die einzuhaltenden Nebenbedingungen beschreiben. Dessen Lösung ist nach Werling mithilfe der Lagrange-Funktion

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} u^2 - \psi^T [f - \dot{\xi}] = \frac{1}{2} u^2(t) + \psi_1 [\dot{\xi}_1 - \xi_2] + \psi_2 [\dot{\xi}_2 - \xi_3] + \psi_3 [\dot{\xi}_3 - u] \quad (3.4)$$

möglich. Hieraus resultiert für $\xi(t)$ die Trajektoriengleichung zwischen einem Anfangs- und Endzustands $\xi(t_0)$, $\xi(\tau)$ gemäß Gleichung 3.5:¹⁸

$$\xi(t) = M_1(t) c_{012} + M_2(t) c_{345}, \quad (3.5)$$

$$\text{mit } M_1(t) = \begin{bmatrix} 1 & t & t^2 \\ 0 & 1 & 2t \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad M_2(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^4 & t^5 \\ 3t^2 & 4t^3 & 5t^4 \\ 6t & 12t^2 & 20t^3 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

¹⁷Der Ruck entspricht der zeitlichen Ableitung einer Beschleunigung.

¹⁸Deren Herleitung wird in [138] beschrieben.

$$\text{mit } c_{012} = M_1(t_0)^{-1}\xi(t_0), \quad c_{345} = M_2(\tau)^{-1}[\xi(\tau) - M_1(\tau)c_{012}]. \quad (3.7)$$

Der Anfangszustand $\xi(t_0)$ ergibt sich aus dem aktuellen Zustand des Fahrzeugs. **Die spezifische Anpassung des Bahnplanungsalgorithmus für das NHA** spiegelt sich in den noch zu bestimmenden Variablen in Gl. 3.5 wieder. Dies sind der Endzustand $\xi(\tau)$ und der Zeitpunkt τ , an dem der Endzustand erreicht wird. Mögliche Zielzustände ergeben sich aus den Relativpositionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen anderer Verkehrsteilnehmer. In Abb. 3-10 oben ist ein Verkehrsszenario mit zwei Fahrstreifen dargestellt. Bevorzugte Zielpunkte des Notfallfahrzeugs sind die Mittelpunkte der Verkehrslücken auf dem rechten Fahrstreifen (Lückenmittelpunkt LM). Als Alternativpunkte zur Berechnung von Zieltrajektorien dient der Folgepunkt (F), falls ein Fahrstreifenwechsel noch nicht durchführbar ist.

Für die möglichen Anfahrtspunkte (LM1, LM2, F) gilt es außerdem den Endzeitpunkt τ zu bestimmen. Hierfür wird nach Werling zunächst ein Sampling über ein bestimmtes Intervall von Endzeitpunkten $\tau \in [\tau_{\min}; \tau_{\max}]$ durchgeführt. Die Trajektorien der daraus resultierenden Bündel unterscheiden sich durch die Endzeit, die für das Anfahren der Zielzustände benötigt wird (vgl. Abb. 3-10, unten). Während eine zu kurz gewählte Zeit zu Stellgrößen führen wird, die von den Aktuatoren nicht ausführbar sind, wird eine zu lange Zeit zu einem trägen Verhalten des Fahrzeugs führen.

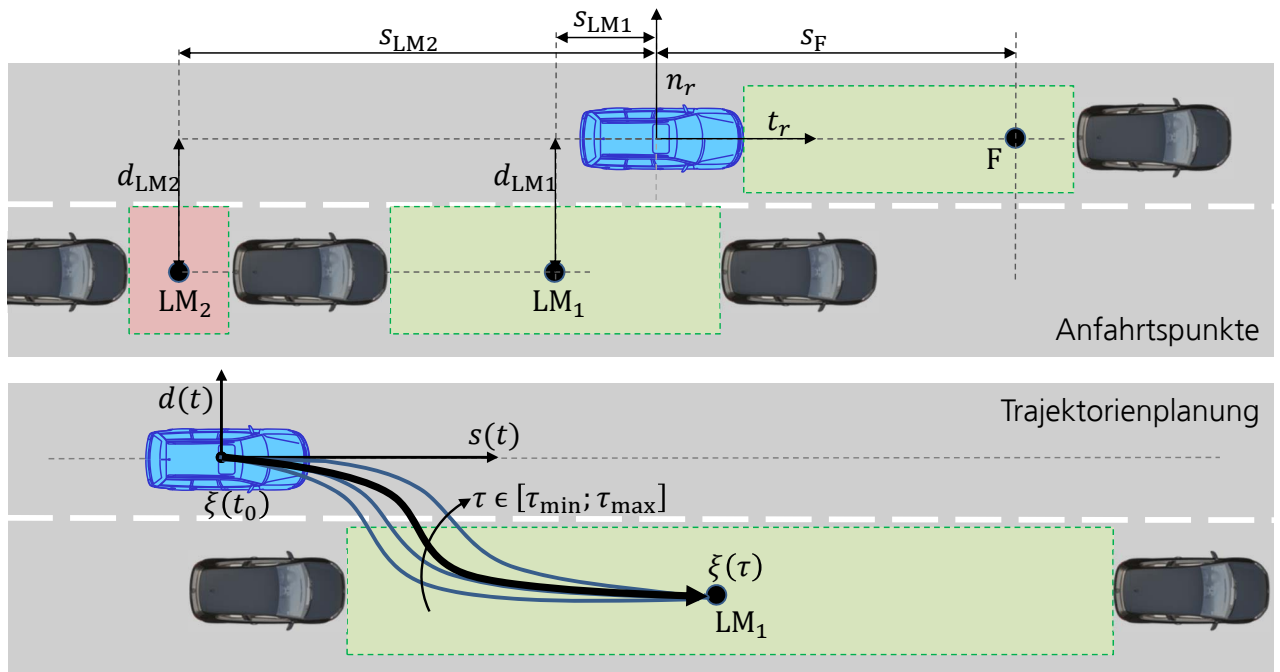


Abbildung 3-10: Anfahrtspunkte und Trajektorienbündel der Bahnplanung

Die Wahl der Endzustände und der Endzeitpunkte erfolgt durch die in Gl. 3.2 eingeführte Bewertung der Trajektorien durch Kostenfunktionen. Für die Bewertung werden neben einer ruckminimalen Auslegung weitere Optimierungskriterien ausgewählt und durch die Kostenfunktio-

nen K_i abgebildet. K_i wird für alle Trajektorien $i \in [1, n]$ berechnet und ergibt sich aus der Summe der Einzelkosten k_j , $j \in [1, m]$, gewichtet durch einen Faktor g_j (vgl. Gl. 3.8).

$$K_i = \sum_{j=0}^m g_j k_j. \quad (3.8)$$

Mit den Gewichtungsfaktoren g_j lässt sich eine Gewichtung zwischen den Einzelkosten k_j erzielen. Für alle Trajektorien werden die Kosten $K_{s,i}$, $K_{d,i}$ getrennt in Längs- und Querrichtung durch

$$K_{s,i} = g_{\ddot{s}} k_{\ddot{s},i} + g_{\dot{s}} k_{\dot{s},i} + g_{\ddot{s}>0} k_{\ddot{s}>0,i}. \quad (3.9)$$

$$K_{d,i} = g_{\ddot{d}} k_{\ddot{d},i} + g_{FS} k_{FS,i}. \quad (3.10)$$

berechnet.

Mit den Komfortkosten zur Bewertung der Längs- und Querbewegung $k_{\ddot{s},i}$, $k_{\ddot{d},i}$ werden hohe Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung bestraft. Ebenfalls geht eine Abweichung von der Zielgeschwindigkeit durch die Kostenfunktion $k_{\dot{s},i}$ zur Bewertung der Längstrajektorien ein. Zur Vermeidung von positiven Beschleunigungen gemäß Kap. 3.1 wird die Kostenfunktion $k_{\ddot{s}>0,i}$ verwendet, die geschwindigkeitserhöhende Trajektorien bestraft. Mithilfe der Kostenfunktion $k_{FS,i}$ werden Quertrajektorien besser bewertet, die zu einem Fahrstreifenwechsel in Richtung des rechten Nachbarfahrstreifens führen. Die Berechnung der Kostenfunktionen sowie der Gewichtungsfaktoren ist in Anhang A.1 dargestellt.

Zur Auswahl einer durchführbaren Kombination aus Längs- und Quertrajektorien im Hinblick auf umliegende Verkehrsteilnehmer erfolgt eine Überprüfung der Sicherheitsabstände. Hierfür werden Schnittpunkte zwischen den berechneten Trajektorien und den prädizierten¹⁹ Trajektorien der anderen Verkehrsteilnehmer berechnet. Quertrajektorien werden aufsteigend anhand ihrer Kosten mit Längstrajektorien kombiniert. Sobald die Prüfung der Sicherheitsabstände ein positives Ergebnis liefert (keine Unterschreitung der Sicherheitsabstände), werden diese beiden Trajektorien zur Ansteuerung der Aktuatoren freigegeben.

Die Koeffizienten c_0 bis c_5 der Trajektorien werden gemäß Gl. 3.7 für den ausgewählten Endzustand $\xi(\tau)$ in Gl. 3.11 berechnet.

$$\xi(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 + c_5 t^5. \quad (3.11)$$

Die Trajektorien werden mit einer Abtastung von 50 Hz zyklisch aktualisiert. Für den Fall, dass keine Trajektorie die Prüfung des Sicherheitsabstandes besteht, wird eine Notfalltrajektorie mit der maximal verfügbaren Verzögerung gewählt.

¹⁹Die Prädiktion der umliegenden Verkehrsteilnehmer ergibt sich aus der gemessenen Längsbeschleunigung und -geschwindigkeit der Objekte. Ihre Beschleunigung wird als zeitlich exponentiell abklingend angenommen.

Zur Umsetzung der ausgegebenen Trajektorien $\xi(t)$ in Längs- und Querrichtung (Gl. 3.11) werden Stellgrößen zur Ansteuerung der Aktuatoren berechnet. Die Voraussetzung dafür ist ein Fahrzeug, das Schnittstellen zur Ansteuerung der Längsregelung (z. B. Momenten- oder Beschleunigungsschnittstelle zum Motorsteuergerät) und der Querregelung (z. B. elektromechanische Hilfskraftlenkung) bietet.

Für die Querführung werden anhand der gewünschten Quergeschwindigkeit $\dot{d}(t)$ und der Querablage $d(t)$ Eingangsgrößen für die Lenkaktuatoren berechnet. Hierfür eignen sich bspw. kaskadierte Bahnführungsregelalgorithmen (wie z. B. in [129], [87]), bei denen mithilfe eines inversen Einspurmodells und eines nachgeschalteten Lenkmomentenreglers das passende Lenkmoment berechnet werden.

Zur Längsregelung eignen sich Folgeregelalgorithmen, die eine Wunschgeschwindigkeit $\dot{s}(t)$ einregeln. Hieraus werden mithilfe von Längsdynamikmodellen Motor- oder Bremsmomente berechnet.

3.4.4 Ausgabeschnittstellen zur Information des Fahrers (HMI)

In Kap. 2 wurde gezeigt, dass bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen gewährleistet werden muss, dass die Systeme vom Fahrer beherrschbar sind. Hierfür ist eine ausreichende Information des Fahrers über aktuelle Systemzustände und -handlungen notwendig, so dass er jederzeit das System überstimmen und abbrechen kann.

Im konkreten Fall des NHA besteht die Hauptaufgabe der Informationsausgabeschnittstellen darin, dem handlungsunfähigen aber evtl. nicht bewusstlosen Fahrer und andere Fahrzeuginsassen über den aktuellen Zustand des Systems sowie über das geplante Manöver zu informieren. Des Weiteren gilt es, die Bedienbarkeit des Systems bei Fehlauflösungen durch geeignete Informationen sicherzustellen. Hierdurch wird auch bestmöglich vermieden, dass das System für Zwecke verwendet wird, in denen kein medizinischer Notfall vorliegt (Fehlgebrauch).

In Tab. 3-3 ist ein möglicher Entwurf für die Anzeigeelemente eines NHA dargestellt. Die Informationen werden dem Fahrer über verschiedene Schnittstellen in dem jeweiligen Systemzustand vermittelt (vgl. Zustandsmaschine in Kap. 3.4.3). Als Interaktionskanäle werden der visuelle (Symbole und Grafiken im Kombiinstrument), auditive (Warntöne) und haptisch/kinästhetische Kanal (Bremsruck) genutzt.

Zunächst wird der Fahrer bei jeder Zustandsänderung des NHA auditiv durch einen Gong informiert. Sobald die Vorstufe des Systems aktiviert ist (Zustand 3), ertönt zusätzlich ein Warnton, der mit dem Ablauf des Countdowns in der Lautstärke und Frequenz zunimmt. Sobald das System aktiv ist (Zustände 5-9) oder sich im Notbetrieb befindet (Zustand 4), bleibt der Warnton mit konstant hoher Frequenz (ca. 2 Hz) eingeschaltet.







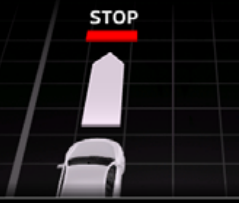


Zustand	Fahrerwarnung	Fahrerwarnung visuell		Umfeldwar- nung
	Auditiv	Information	Symbol	
1) System deaktiviert	-	-	-	-
2) Fehler- zustand	- 1x Gong bei Aktivierung	Warnsymbol für Systemfehler		-
3) Vorstufe	- 1x Gong bei Aktivierung - Warnton mit zunehmender Lautstärke und Frequenz	- Kombi: "Safe- Stop wird aktiviert" - Countdown	 Safe-Stop wird aktiviert	-
4) Not- betrieb	- Gong bei Aktivierung des Zustands (1x) - danach Dauerwarnton	- Kombi: "Notbetrieb! "	 Notbetrieb!	Koopera- tive Umfeldwar- nung (Kapitel 4)
5) Manöver- auswahl		- Kombi: "Safe- Stop aktiv"		
6) Weiter- fahrt		- Symbole für Fahrstreifen- wechsel		
7) Fahrstrei- fenwech- sel			 Safe-Stop aktiv	
8) Verzö- gerung in den Stillstand			- Kombi: "Safe- Stop aktiv" - Symbole für Nothalt	 STOP  Safe-Stop aktiv
9) Still- stand		- Kombi: "Safe- Stop erreicht! " - Notruf - Parkbremse	 Safe-Stop erreicht! Notrufverbindung hergestellt	Warnblink- licht
Transition 5,8	- 1x Gong bei Aktivierung	- Kombi: "Safe- Stop abge- brochen "	 Safe-Stop abgebrochen	-

Tabelle 3-3: HMI-Ausgaben des Nothalteassistenzsystems

Im Kombiinstrument werden dem Fahrer zusätzlich die Systemzustände über Grafiken angezeigt.²⁰ In Zustand 2 wird ein rot umrandetes Symbol zur Kennzeichnung der Fehlfunktion angezeigt. Tritt der Fehler nach der Aktivierung des Systems oder der Vorstufe auf (Zustand 4), wird der Notbetrieb des Systems angezeigt. Bei den aktiven NHA-Zuständen (Zustände 5-8) werden die bevorstehenden Fahrmanöver angezeigt. Nach dem Erreichen des Stillstands wird die Notrufverbindung angezeigt. Im Fall eines manuellen Systemabbruchs (Transitionen 5 und 8) wird für ca. 3 s der Systemabbruch angezeigt.

Zur Warnung des Fahrzeugumfelds wird in den Zuständen 4-8 die in Kap. 5 beschriebene Warnstrategie aktiviert, die sich aus einer Kombination von Lichtfunktionen (Ansteuerung des Warnblinklicht und der Fahrtrichtungsanzeiger) und verschiedenen Fahrmanövern (Schlangenlinie, Spurversatz) zusammensetzt. Im Zustand 9 bleibt, einhergehend mit dem Stillstand des Fahrzeugs, das Warnblinklicht aktiviert.

In Zustand 3 werden zusätzlich Bremsrucke (haptisches/kinästhetisches Feedback) vom Fahrzeug durchgeführt, um die bevorstehende Aktivierung anzukündigen und den Fahrer zur Übernahme aufzufordern.

3.5 Zusammenfassung

Basierend auf den Anforderungen in Tab. 2-4 wurde in Kap. 3 ein Konzept für eine risikominimale Auslegung eines NHA vorgestellt. Hierfür wurden zunächst Maßnahmen abgeleitet, die sich aus der zentralen Anforderung zur Betriebsgefahrenreduktion ergeben. Darauf basierend wurden drei mögliche Funktionsumfänge eines NHA definiert, die sich in der Differenzierbarkeit der Verkehrssituationen und der dadurch durchführbaren Fahrmanöver unterscheiden. Aufbauend auf bekannten Funktionsarchitekturen für hoch- und vollautomatische Fahrfunktionen wurden im Anschluss die für ein NHA notwendigen Anpassungen beschrieben, die primär die Komponenten zur Umfeldwahrnehmung, Systemlogik (Entscheider) und Bedienung (HMI) betreffen.

Die Maßnahmen zur Senkung der Betriebsgefahr orientieren sich primär an der Geschwindigkeitsreduktion des Fahrzeugs bis in den Stillstand. Auf Fahrbahnen mit mehreren Fahrstreifen ist es zielführend, Fahrstreifenwechsel in Richtung des Seitenstreifens durchzuführen, um das Risiko von Auffahrunfällen zu vermeiden. Hierfür ist es denkbar, das Fahrzeug automatisch geführt weiterfahren zu lassen, um eine geeignete Position zum Abstellen des Fahrzeugs zu erreichen. Eine geeignete Warnung anderer Verkehrsteilnehmer ist vorzusehen.

Anhand dieser Maßnahmen wurden im Anschluss mögliche Funktionsumfänge des NHA abgeleitet. Eine Unterteilung ist möglich, sofern die in den Systemgrenzen beinhalteten Funktionsumfänge nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik ausgelegt und abgesichert werden. Diese Annahme kann allerdings nur getroffen werden, wenn eine Fehlauflösung des

²⁰Im konkreten Beispiel wurde zur Verbesserung der Übersichtlichkeit der Begriff „Safe-Stop“ als Bezeichnung des NHA gewählt.

Systems durch eine geeignete Eskalationsstrategie ausgeschlossen wird. Die Funktion mit dem geringsten Umfang beinhaltet ein mittengeführtes Halten im eigenen Fahrstreifen, unabhängig von der Verkehrssituation. Als Funktionserweiterungen ist die Durchführung eines bzw. mehrerer Fahrstreifenwechsel denkbar.

Für eine Realisierung des Gesamtsystems wurden im Anschluss die Systemkomponenten betrachtet, die ausgehend von der Systemarchitektur einer automatischen Fahrfunktion für das NHA angepasst werden müssen. Hierfür wurden u.a. Anforderungen an das Bedienelement zur manuellen Aktivierung des NHA abgeleitet und in einem möglichen Konzept umgesetzt. Für die verschiedenen Funktionsumfänge wurden anschließend mögliche Sensorkonfiguration zur Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds diskutiert, mit dem Ergebnis, dass eine Kombination aus Fern- und Nahbereichsradaarsensoren, einer Mono-Kamera und Ultraschallsensoren für eine Abdeckung der meisten Verkehrssituationen ausreichend erscheint. Außerdem wurde ein Entwurf für eine Zustandsmaschine zur Ansteuerung aller Systemzustände beschrieben. Für die Umsetzung der Fahrmanöver unter Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer wurde anschließend ein Bahnplanungsalgorithmus gemäß der Gestaltungsmaßnahmen eines NHA angepasst. Abschließend wurde ein HMI-Konzept vorgestellt, durch das der Fahrer vor der Systemaktivierung eskalierend gewarnt wird. Die Vermeidung von Fehlaktivierungen sowie des Systemfehlgebrauchs wurde dabei berücksichtigt.

Anknüpfungspunkte für Folgearbeiten ergeben sich ausblickend u.a. hinsichtlich einer differenzierten Bewertung von automatischen Fahrmanövern bzgl. ihres Einflusses auf die Betriebsgefahr. Ein Maß zur Bestimmung des Risikos von automatischen Fahrmanövern wird die Systemgrenzen des NHA genauer beschreibbar machen, so dass eine Aussage über Dauer und Geschwindigkeit von Manövern des NHA möglich wird. Dieses Maß wird außerdem Aussagen darüber ermöglichen, inwiefern Funktionserweiterungen des NHA zur Erkennung von weiteren Sondersituationen realisierbar sind (z. B. bzgl. des Anhaltens auf Ein- und Ausfädelstreifen oder in Tunneln), ohne dass sich die Betriebsgefahr des Systems erhöhen wird.

Bei der Wahl der geeigneten Umfeldsensoren für ein NHA gilt es ausblickend zu betrachten, welche Anforderungen sich hinsichtlich möglicher Sensorausfälle und Systemfehler an eine redundante Systemgestaltung ergeben. Darüber werden sich mithilfe einer Gefahren- und Risikoanalyse nach ISO 26262 Aussagen treffen lassen. Einem NHA wird dabei zugutekommen, dass eine tatsächliche Aktivierung des Systems selten auftreten wird, so dass die Bewertung der Situationen eines aktivierten NHA im Vergleich zu anderen Fahrerassistenzsystemen zu einem geringeren ASIL führen wird.

Bezüglich des HMI-Konzepts zur Information des Fahrers über die Systemzustände des NHA ist eine Folgebetrachtung aus psychologischer Sicht denkbar. Insbesondere gilt es zu klären, welche Informationen ein fahrunfähiger aber nicht bewusstloser Fahrer benötigt, um nach der Aktivierung des NHA die Systemzustände korrekt zu interpretieren und nicht in Panik zu geraten.

Aufgrund des begrenzten Geschwindigkeitsbereichs, der bei Fahrzeugen mit manuell geschalteten Getrieben in einem bestimmten Gang fahrbar ist, ist zunächst eine Kopplung des NHA mit automatisierten Getrieben empfehlenswert. Für weitere Systemausprägungen mit handgeschalteten Getrieben gilt es, die Trajektorien des Notfallfahrzeugs so anzupassen, dass der Zielfahrstreifen mit einer für den aktuell eingelegten Gang ausreichend hohen Geschwindigkeiten angefahren wird. Somit kann sichergestellt werden, dass ein planmäßiges Abwürgen des Motors aufgrund zu niedriger Drehzahlen erst erfolgt, wenn durch das NHA keine Fahrstreifenwechsel mehr durchzuführen sind. Ein Abwürgen des Motors würde nämlich zu einer Unlenkbarkeit des Fahrzeugs führen, da dadurch die Energieversorgung zu den Lenkaktuatoren unterbrochen wird.

Zukünftig ist außerdem eine Kopplung des NHA mit weiteren Fahrerassistenzsystemen denkbar, mit denen bspw. Notbrems- oder Notausweichmanöver als Reaktionen auf plötzliche Hindernisse auf der Fahrbahn durchführbar sind.

4 Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug

Im folgenden Kapitel wird gemäß den Anforderungen und Forschungsfragen in Kap. 2 die Erkennung von medizinischen Notfällen zur Aktivierung eines Nothalteassistenzsystems betrachtet. Hierfür wird eine Top-Down-Herangehensweise gewählt, bei der zunächst von den medizinischen Notfällen ausgegangen wird, die beim Führen von Fahrzeugen auftreten können, um anschließend geeignete Methoden und Sensoren zu deren Detektion zu bestimmen (vgl. Abb. 4-1).

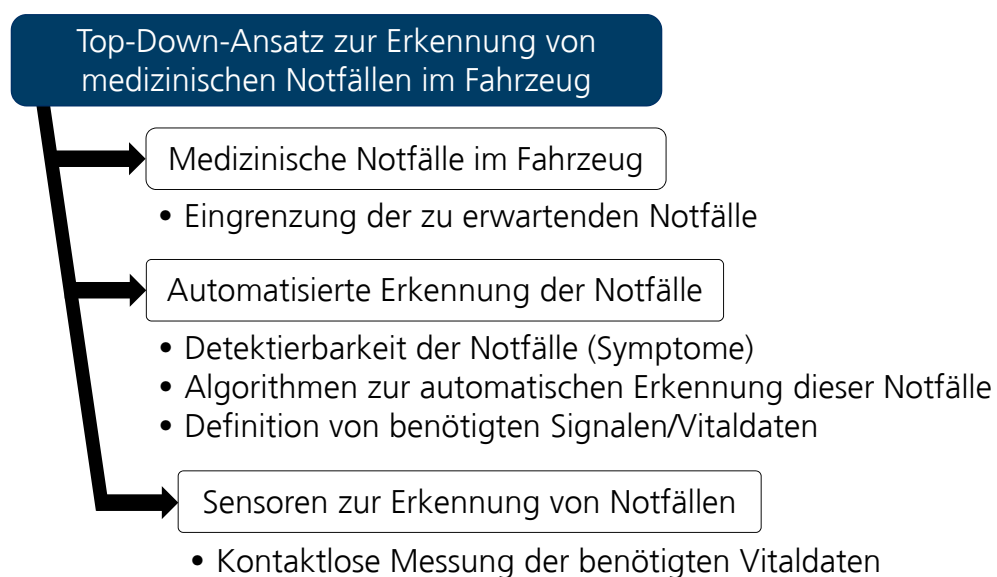


Abbildung 4-1: Top-Down-Ansatz zur Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug

Im ersten Abschnitt wird untersucht, welche medizinischen Notfälle sich beim Führen eines Fahrzeugs ereignen können und mit welchen Auftretenswahrscheinlichkeiten zu rechnen ist. Unfallstatistiken werden um Expertenmeinungen ergänzt.

Für die Gruppe der am häufigsten auftretenden kardiovaskulären¹ Notfälle werden Möglichkeiten zu deren Detektion diskutiert, die sich hauptsächlich aus dem klinischen Umfeld ableiten lassen. Hierfür werden zunächst biomedizinische Grundlagen inkl. der relevanten Messgrößen (sog. Vitalparameter) eingeführt, anhand derer Ausprägungen eine automatisierte Erkennung

¹Das Herz und das Gefäßsystem betreffend.

der kardiovaskulären Notfälle denkbar ist. Der Fokus wird dabei auf die Messung der mittleren Herzrate (HR) gelegt. Anschließend werden Sensoren zur Erfassung dieser Messgröße im Fahrzeug vorgestellt, wobei die Prämisse einer nicht-invasiven und weitestgehend kontaktlosen Messung berücksichtigt wird.

Im letzten Abschnitt wird die Evaluation zweier kontaktloser Sensoren zur Messung der Herzrate vorgestellt. In einem Laboraufbau werden ein kapazitives und ein kamerabasiertes Verfahren zur Herzratenmessung einer konventionellen Elektrokardiographie gegenübergestellt und im Rahmen einer Probandenstudie evaluiert.

In diesem Kapitel wird auf Ergebnisse von Mirwaldt et al. zur Analyse von medizinischen Notfällen in Kraftfahrzeugen [80] und zur Evaluation von nicht-invasiven Sensoren zur Herzratenmessung [79] eingegangen.

4.1 Medizinische Notfälle im Fahrzeug

Zur Detektion von medizinischen Notfällen im Fahrzeug ist zunächst eine Analyse der zu erwartenden Notfälle notwendig, die im direkten Zusammenhang mit der Fahruntfähigkeit stehen bzw. diese verursachen können.

Im Vorfeld ist anzumerken, dass für einige Erkrankungen bereits in der Fahrerlaubnis-Verordnung (FeV)² die Eignung zur Teilnahme am Straßenverkehr sowie gegebenenfalls ein Entzug der Fahrerlaubnis geregelt sind.³ In Tab. 4-1 sind einige Erkrankungen zu beiden Fällen, Eignung oder Nichteignung zum Führen von PKW, aufgelistet. Bei jeder Erkrankung ist eine individuelle Beurteilung durch einen Facharzt unumgänglich. Einschränkungen durch Alkohol- und Drogenmissbrauch wurden nicht übernommen, da sie nicht im primären Fokus dieser Arbeit stehen.

Eine genaue Bestimmung der Erkrankungen, die in medizinischen Notfällen beim Führen eines Fahrzeugs resultieren, ist durch eine Betrachtung von Verkehrsunfällen nur bedingt möglich. Dies liegt hauptsächlich daran, dass bei Analysen von Verkehrsunfällen häufig ungeklärt bleibt, ob der medizinische Notfall (z. B. Herzinfarkt) unmittelbar vor oder erst nach dem Unfall eingetreten ist [84].

Einen Anhaltspunkt zur Eingrenzung der möglichen Erkrankungen bietet allerdings die Betrachtung von Verkehrsunfällen mit Todesfolge. Wie in Kap. 1.1 dargestellt wurde, sind Obduktionen nach Verkehrsunfällen in Deutschland zwar selten, jedoch finden sich in der Literatur vereinzelte Studien zu Unfallanalysen, bei denen natürliche medizinische Ursachen als Grund für das Eintreten der Notfälle identifiziert wurden.

²Anlage 4 zu §§ 11, 13 und 14 FeV.

³Gemäß § 10 der Medizinischen Berufsordnung für Ärzte muss darüber hinaus dokumentiert werden, wenn ein medizinischer Befund zur Einschränkung der Fahrfähigkeit führen kann.

Bereich	geeignet oder bedingt geeignet	nicht geeignet
Schwerhörigkeit und Gehörlosigkeit	Hochgradige Schwerhörigkeit (Hörverlust von 60 % und mehr), Gehörlosigkeit (ohne Sehstörung, Gleichgewichtsstörungen)	Störungen des Gleichgewichts
Herz- und Gefäßerkrankungen	Herz- und Gefäßerkrankungen (nach erfolgreicher Behandlung)	Herzrhythmusstörungen mit anfallsweiser Bewusstseinstörung oder Bewusstlosigkeit
Zuckerkrankheit	Bei ausgeglichener Stoffwechselsituation unter der Therapie mit Diät oder Insulin	Neigung zu schweren Stoffwechselentgleisungen
Krankheiten des Nervensystems	Parkinson (leichte Fälle und erfolgreiche Therapie), Epilepsie (ja, wenn keine Anfallrezidiven bestehen, d.h. z.B. ein Jahr anfallsfrei)	Wiederkehrende epileptische Anfälle
Psychische Störungen	Leichte hirnorganische Psychosynonyme; leichte Intelligenzstörungen ohne Persönlichkeitsstörungen	Akute organische Psychosen; alle Manien und schwere Depressionen; Akute schizophrene Psychosen
Sonstiges	Behandelte Schlafstörungen mit Tagesschläfrigkeit	Unbehandelte Schlafstörungen mit messbarer Tagesschläfrigkeit; Schwere Lungen- und Bronchialerkrankungen

Tabelle 4-1: Auszug aus der Fahrerlaubnis-Verordnung (Anlage 4 zu §§ 11, 13 und § 14 FeV - Eignung und bedingte Eignung zum Führen von Kraftfahrzeugen)

In einer Studie von Motozawa et al. [83] wurden zwischen 1997 und 2006 insgesamt 216 Verkehrstote in Obduktionen untersucht. Bei 34 Personen wurde ein plötzlicher medizinischer Notfall als Ursache für das Eintreten des Unfalls vermutet. Eine genauere Analyse ergab, dass 32 der 34 (94 %) Notfälle auf kardiovaskuläre Erkrankungen zurückzuführen sind, die zum Zeitpunkt des Verkehrsunfalls zur Fahruntfähigkeit des Fahrers geführt haben (vgl. Tab. 4-2).

	Todesursache	Anzahl der Fälle
Kardio-vaskulär	Ischämische Herzerkrankung	22
	Zerebrovaskuläre Erkrankungen	5
	Erkrankungen der Aorta (Aortenaneurismen)	5
	Leberzirrhose	1
	Lungentuberkulose	1

Tabelle 4-2: Todesursachen bei 34 Verkehrsunfällen, hervorgerufen durch medizinische Notfälle beim Fahrer (Nach einer Studie von Motozawa et al. [83])

Halinen und Jausi [51] haben Verkehrsunfälle in Finnland und der Schweiz zwischen 1984 und 1989 untersucht. In Finnland werden seit 1984 alle Verkehrstoten obduziert, wenn sie innerhalb von drei Tagen nach dem Unfall versterben. Die Ergebnisse zeigen, dass mindestens die Hälfte aller untersuchten Fälle auf einen Herzstillstand bei den Fahrzeugführern zurückzuführen

sind (Finnland (Schweiz): 2,1 % (1,7 %) kardiovaskuläre Notfälle bei 3,9 % (3,4 %) medizinisch bedingten Unfällen).

In einer australischen Literaturübersicht zu natürlichen Todesfällen und Suizidfällen am Steuer werden diese Zahlen erneut bestätigt [117]. In den betrachteten Studien machen kardiovaskuläre Ursachen einen Anteil von 77 % bis 94 % der Unfälle mit natürlichen Todesursachen aus (Peterson et al. (80 %) [107], Christian (84 %) [24], West et al. (94 %) [140]). In einer Studie von Cheng et al. werden bei 80 aus 86 Fällen (93 %) kardiovaskuläre Ursachen festgestellt [23].

In einer Studie aus Großbritannien von Taylor [131] aus dem Jahr 1995 wurden 2000 Verkehrsunfälle untersucht, die durch einen plötzlichen Verlust des Bewusstseins verursacht wurden.⁴ Das Ergebnis der Studie ist, dass 38 % der Unfälle auf epileptische Anfälle und 21 % auf plötzliche Blackouts (Synkopen) zurückzuführen sind. Kardiovaskuläre Notfälle machen lediglich einen Anteil von ca. 8 % aus. Allerdings ist hierbei anzumerken, dass der geringe Anteil an kardiovaskulären Notfällen auch der Einteilung der Notfälle während der Datenerhebung geschuldet sein kann. So ist bspw. denkbar, dass Notfälle mit kardiovaskulären Ursachen den Synkopen zugeschrieben werden, da sie sich in Form eines Blackout manifestiert haben.

Ein weiteres Indiz, das dafür spricht, dass kardiovaskuläre Erkrankungen einen Großteil der medizinischen Notfälle im Fahrzeug ausmachen, lässt sich aus Statistiken zu häufigen Todesursachen in der Gesamtbevölkerung ableiten. In Abb. 4-2 sind die zehn häufigsten Todesursachen in Deutschland für das Jahr 2011 abgebildet. Es ist erkennbar, dass kardiovaskuläre Notfälle in Summe den größten Anteil ausmachen (20,7 % bei der männlichen und 22,7 % bei der weiblichen Bevölkerung). Somit lässt sich auch eine erhöhte Auftretenswahrscheinlichkeit dieser Notfälle im Fahrzeug vermuten.

Zusammenfassend ist feststellbar, dass kardiovaskuläre Erkrankungen einen signifikanten Anteil der medizinischen Todesursachen ausmachen und auch großteils ursächlich für Verkehrsunfälle sind, die sich auf medizinische Notfälle beim Fahrzeugführer zurückführen lassen. Aus Experten-sicht besteht des Weiteren die Möglichkeit, dass sich neben kardiovaskulären auch Notfälle wie epileptische Anfälle, Synkopen, Schlaganfälle und Zuckerschocks ereignen können [80]. Da die zuvor vorgestellten Recherchen zu Unfallstatistiken jedoch einen Schwerpunkt bei kardiologische Notfällen erkennen lassen, wird im weiteren Verlauf der Arbeit auf Möglichkeiten zu deren automatisierter Erkennung im Fahrzeug eingegangen.

⁴Es ist nicht bekannt, wie groß der darin enthaltene Anteil an Verkehrsunfällen mit Todesfolge ist.

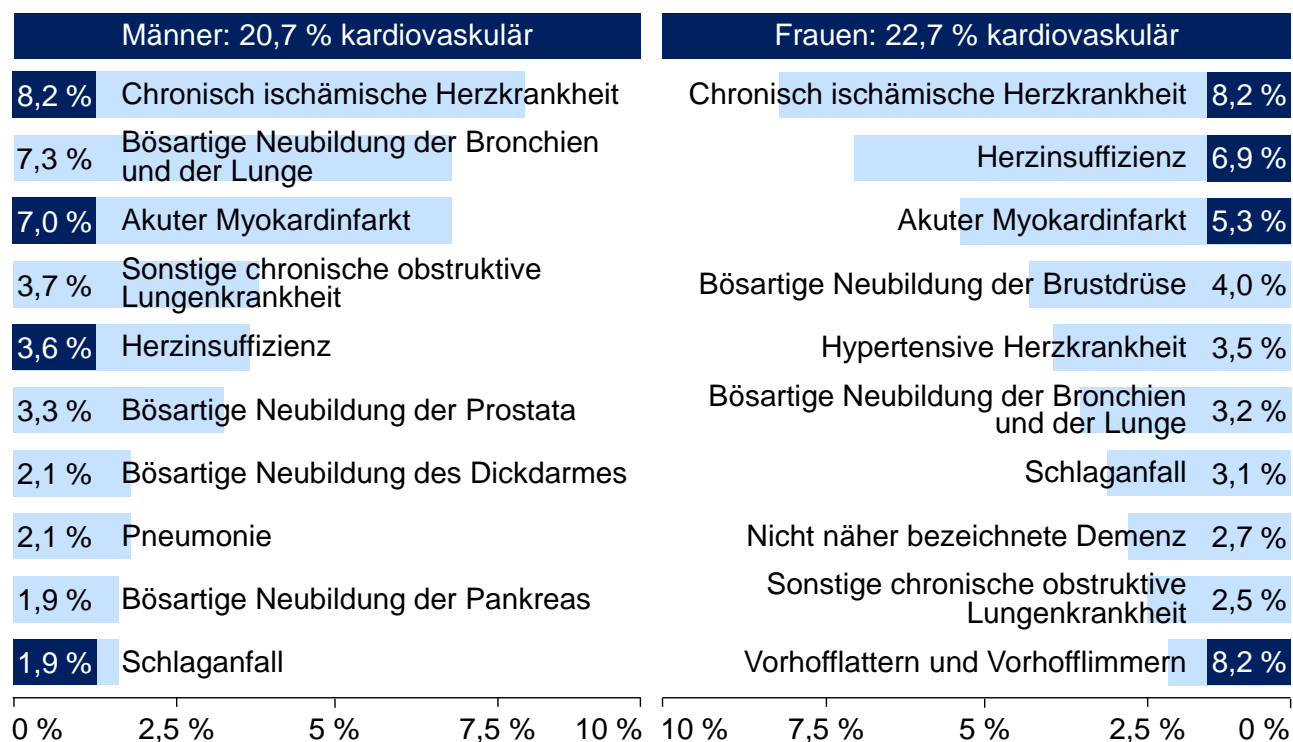


Abbildung 4-2: Todesursachen in Deutschland (Statistisches Bundesamt 2011)

4.2 Grundlagen zur Erkennung von kardiovaskulären Notfällen

Da im weiteren Verlauf auf die automatische Erkennbarkeit von kardiovaskulären Notfällen im Fahrzeug eingegangen werden soll, werden zunächst einige medizinische Grundlagen zur Entstehung dieser Notfälle sowie zu deren klassischer Diagnostizierbarkeit im klinischen Umfeld beschrieben.

4.2.1 Das Herz-Kreislauf-System

Das Herz-Kreislauf-System stellt das zentrale Versorgungssystem des Körpers dar und besteht aus zwei Kreisläufen (vgl. Abb. 4-3, links oben). Im Lungenkreislauf wird das Blut zur Lunge gepumpt und mit Sauerstoff angereichert. Im Körperkreislauf wird das Blut in den Körper gepumpt und versorgt ihn mit Sauerstoff und Nährstoffen. Der Herzmuskel übernimmt dabei die Funktion der Pumpe, so dass ein bestimmtes Blutvolumen durch Aufbau eines Blutdrucks in die zu versorgenden Organe gelangt. Die einzelnen Kammern des Herzen sind durch Klappen getrennt, wobei das Blut zunächst durch die Vorhöfe (Atrium) in die Hauptkammern (Ventrikel) einströmt und anschließend das Herz verlässt. Die Versorgung des Herzmuskels wird über Herzkranzgefäße (Koronararterien) sichergestellt, die das Herz kranzförmig umschließen [31][99][55].

Die Erregung der Herzmuskulatur (Myokard) wird dabei von einem autonomen Taktgeber, dem sogenannten Sinusknoten, ausgelöst (Autorhythmie des Herzen bei ca. 60-100 beats per minu-

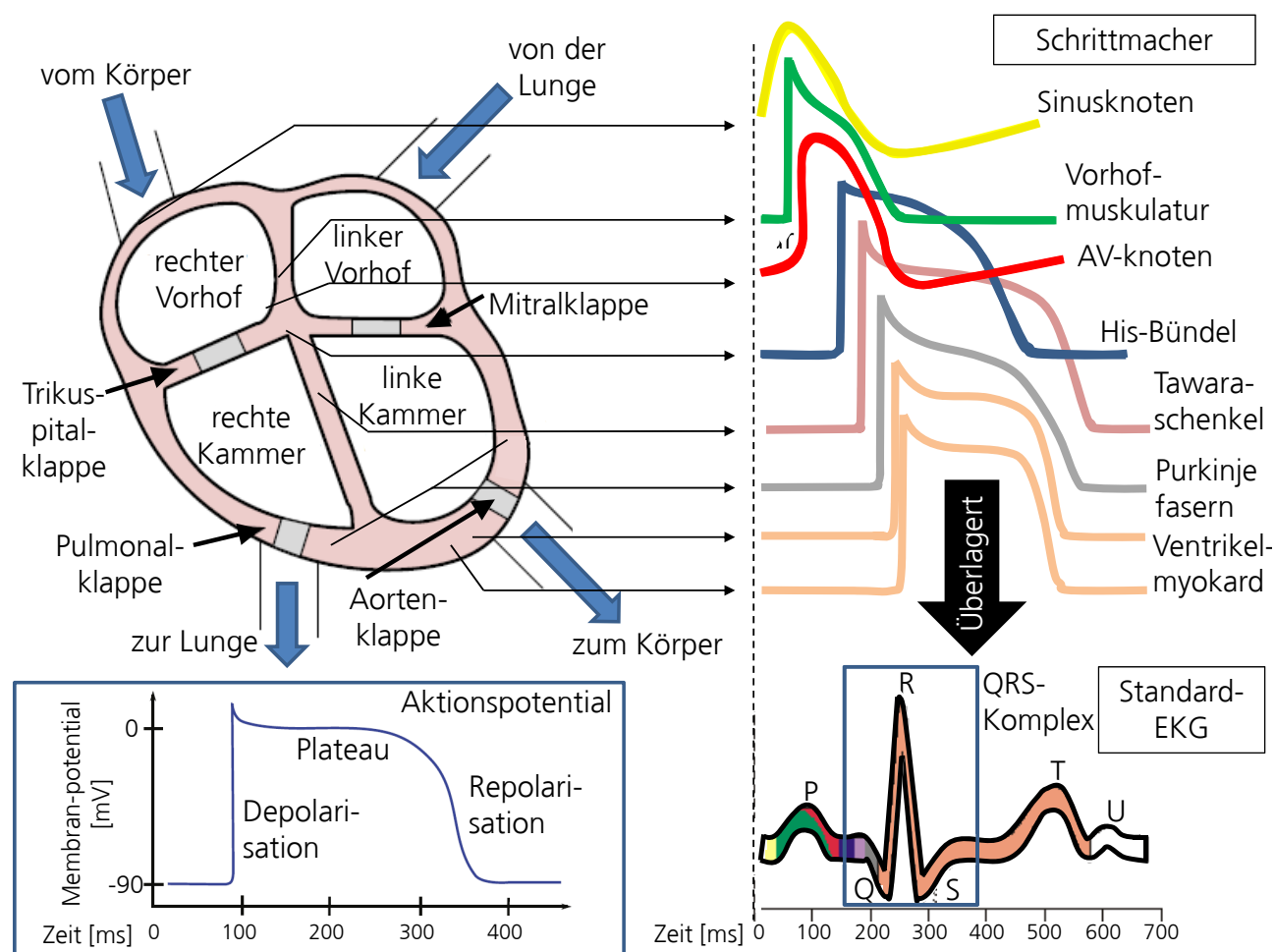


Abbildung 4-3: Verlauf der Aktionspotenziale im Herzen und das daraus entstehende Potential im Standard-EKG (In Anlehnung an [99][76][134][55])

te (bpm). Diese Aktivierungen sind durch Veränderungen der Aktionspotenziale (vgl. Abb. 4-3, links unten) in der entsprechenden Zelle messbar, unterteilt in die Phasen Depolarisation (Erregung), Plateau und Repolarisation (Erregungsrückbildung). Der genaue Verlauf der Aktionspotenziale ist vom Zelltyp abhängig. Auf der rechten Seite von Abb. 4-3 sind die Aktionspotenziale für verschiedene Bereiche des Herzens abgebildet. Ausgehend vom Sinusknoten werden diese Bereiche zeitlich versetzt aktiviert. Die elektrische Aktivierung der Herzmuskelzellen sorgt für eine Kontraktion des Myokards, was zu einer koordinierten Pumpwirkung des Herzens führt.

Die aus den Aktionspotenzialen der Zellen resultierenden Spannungsunterschiede zwischen erregten und nicht erregten Bereichen des Herzens sind in einem Elektrokardiogramm (EKG) messbar (vgl. Abb. 4-3, rechts unten). Das EKG ist die Hauptuntersuchungsmethode der Kardiologie und erlaubt Rückschlüsse auf die Herzaktivität und potenzielle Erkrankungen. Zur Messung der Potentialdifferenzen an der Körperoberfläche (Ableitungen) werden Elektroden am Körper befestigt. Eine Methode zur Aufzeichnung eines EKG ist die auf Einthoven zurückgehende Extremitätenableitung, bei der Elektroden am linken und rechten Arm sowie am linken Bein angelegt werden. Als klinischer Standard hat sich ein 12-kanaliges EKG etabliert, bei dem die 3 Elektroden der Extremitäten um 6 Elektroden im Brustbereich erweitert werden [69]. Dies ermöglicht

die besser orts aufgelöste Aufzeichnung von Aktionspotenzialen und somit eine detailliertere Diagnose.

In Abb. 4-4 (links) ist der typische Verlauf des EKG eines gesunden Menschen dargestellt. Die sogenannte P-Welle wird durch die Erregung der Vorhöfe ausgelöst. Die sich daran anschließende Dauer wird als PQ-Strecke bezeichnet (gleichzeitig ist die PQ-Strecke das Nullpotential des EKG), bevor die Kammererregung (Depolarisation der Ventrikel) durch den QRS-Komplex abgebildet wird (aufgeteilt in Q-, R- und S-Zacke). Die Repolarisation der Ventrikel äußert sich in der T-Welle. Dazwischen befindet sich die ST-Strecke. Die U-Welle ist Bestandteil der Repolarisation und nicht in jedem EKG messbar. Die mittlere Herzrate HR ergibt sich aus den zeitlichen Abständen zwischen den R-Zacken und wird in Schlägen pro Minute (bpm) gemessen [55][99].

Auf der rechten Seite von Abb. 4-4 sind Normwerte für die Abschnitte und Zacken des EKG dargestellt. Sämtliche Verlaufsparemeter des EKG werden im klinischen Umfeld und der Forschung zur Diagnose von Erkrankungen verwendet, auch über die Grenzen von kardiovaskulären Befunden hinaus.

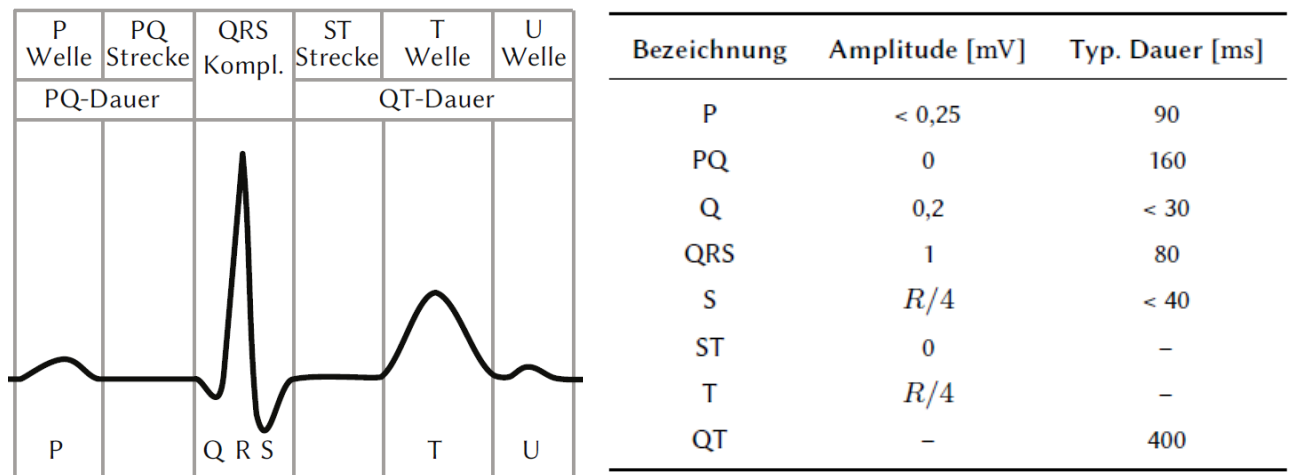


Abbildung 4-4: Schematischer EKG-Verlauf eines gesunden Menschen und dazugehörige Wertebereiche (nach [55])

4.2.2 Kardiovaskuläre Notfälle und deren Detektierbarkeit

Die am häufigsten auftretenden kardiovaskulären Notfälle sind Herzinfarkte und Herzrhythmusstörungen (Arrhythmien) [57]. In Kap. 4.1 wurde bereits gezeigt, dass sich diese Verteilung auch auf medizinische Notfälle, die eine Fahruntfähigkeit des Fahrers verursachen können, übertragen lässt.

Herzinfarkt (Myokardinfarkt)

Der Myokardinfarkt ist eine Erkrankung des Herzens, die aufgrund einer Minderversorgung des Herzmuskels mit Blut (Ischämie) entsteht. In den meisten Fällen ist dafür eine Verstopfung der

Herzkranzgefäße (thrombotischer Verschluss) mit Ablagerungen (Arteriosklerose) oder Blutgerinnseln ursächlich. Dies führt zunächst zu einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herzens sowie im Fall des Infarkts zum Absterben von Herzmuskelgewebe. Im schlimmsten Fall können lebensbedrohliche Herzrhythmusstörungen oder ein plötzlicher Herzstillstand [88] folgen. Es besteht eine Vielzahl unterschiedlicher Infarkte (z. B. Vorderwandinfarkt, Hinterwandinfarkt, Septuminfarkt), die sich anhand der betroffenen Herzmuskelzellen unterscheiden. Eine genaue Bestimmung des Befunds ist im klinischen Umfeld durch ein 12-Kanal-EKG möglich [31].

Hinsichtlich der Erkennung von Herzinfarkten wird in der Literatur darauf hingewiesen, dass Infarkte auch plötzlich auftreten und sich in Form von Schmerzen im Brustbereich, Kurzatmigkeit, Schweißausbrüchen und hohen Herzfrequenzen ankündigen können [57]. Insbesondere Menschen mit Folgeinfarkten können dies merken, noch bevor sie die Kontrolle über den eigenen Körper verlieren [66]. In den in Kap. 4.1 genannten Quellen zu kardiovaskulären Notfällen wird bestätigt, dass es die Fahrzeugführer in einigen Notfällen geschafft haben, das Fahrzeug abzubremsen [83] oder sogar in den Stillstand am Straßenrand zu überführen [23][104]. Es ist allerdings auch denkbar, dass in einzelnen Fällen ein krampfhaftes Verhalten des Fahrers folgen kann [92]. Nichtsdestotrotz bestätigt sich, dass eine manuelle Aktivierung eines NHA durch ein geeignetes Bedienelement hilfreich sein kann, wenn das Eintreten eines medizinischen Notfalls bemerkt wird.

Herzrhythmusstörung (Arrhythmien)

Herzrhythmusstörungen bezeichnen die abnormale Erregung der Herzmuskelzellen. Dies kann durch die elektrische Reizbildung oder Erregungsleitung hervorgerufen werden und äußert sich in einer dauerhaft erhöhten (mehr als 100 bpm) oder erniedrigten (weniger als 60 bpm) Herzfrequenz. Es existieren unbedenkliche Arrhythmien, die sich durch ein sogenanntes Herzstolpern oder zusätzliche Herzschläge (Extrasystolen) im EKG bemerkbar machen. Gesundheitsgefährdende Arrhythmien äußern sich durch eine dauerhafte Erhöhung oder Absenkung der Herzfrequenz, was wiederum zu einer Senkung des Blutdrucks und somit zu einer Unterversorgung des Herz-Kreislauf-Systems mit Blut führt. Dies kann zu einer Unterversorgung des Gehirns mit Blut, Luftnot oder Schwindel bis hin zur Bewusstlosigkeit führen. Die Unterversorgung der Körperzellen mit Blut kann zu deren Absterben führen, was im Falle der Herzkranzgefäße auch zum Herzstillstand führen kann. Wie auch beim Herzinfarkt wird bei den Herzrhythmusstörungen nach dem Ort des Auftretens unterschieden, wobei insbesondere zwischen Vorhof- und Kammerarrhythmien unterschieden wird (z. B. Vorhofflimmern und -flattern, Kammerflimmern und -flattern) [74].

Wie auch im Falle des Myokardinfarkts ist bekannt, dass einsetzende Herzrhythmusstörungen von Patienten in Einzelfällen in Form von Herzklopfen, Herzschmerzen (Angina Pectoris) oder Schwindelgefühlen bemerkt werden können. Es hat sich bereits bei einigen Notfällen herausgestellt, dass eine kurzfristige Manövrierbarkeit von Fahrzeugen beim Eintreten der Notfälle möglich ist [74].

Detektionsmöglichkeiten im EKG

Das klassische Verfahren zur Detektion von kardiovaskulären Notfällen ist das EKG. Dabei wird die Morphologie (charakteristischer Verlauf, siehe Abb. 4-4) des EKG analysiert und anhand von Veränderungen im Verlauf eine potenzielle Erkrankung identifiziert. Eine automatisierte Erkennung dieser Notfälle ist nach wie vor Gegenstand der Forschung, wobei bereits Ansätze bestehen, die sich unter Umständen für den Einsatz im Fahrzeug anwenden lassen.

In Abb. 4-5 ist beispielhaft der zeitliche Verlauf eines Infarkts in der linken Koronararterie (anterobasaler Infarkt) dargestellt. Unmittelbar nach dem Infarkt ist eine Überhöhung der T-Welle feststellbar, die sich nach einigen Stunden zu einer Hebung der gesamten ST-Strecke verändert und nach mehreren Tagen in Form einer verstärkt ausgeprägten Q-Zacke resultiert. Ursächlich dafür ist ein verändertes Membranruhepotential in dem beeinträchtigten Gewebe. Eine genaue Lokalisation der Ischämie ist zumeist durch die Brustwandableitungen eines 12-Kanal-EKG möglich [44].

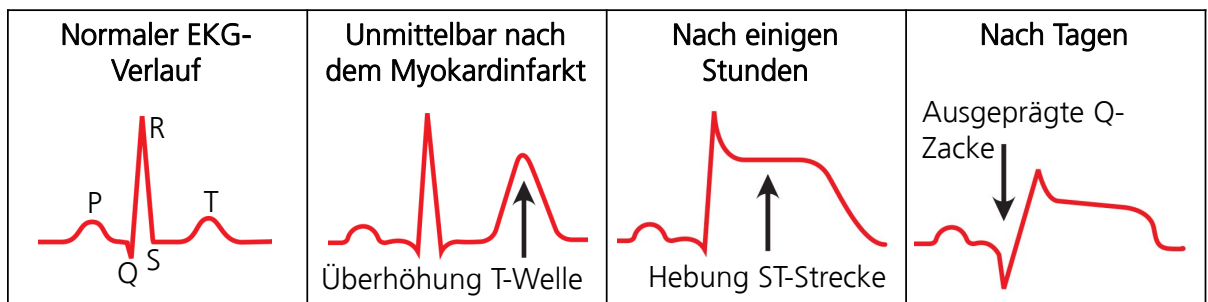


Abbildung 4-5: EKG-Verlauf beim Herzinfarkt (Myokardischämie) (nach [44])

In Abb. 4-6 ist beispielhaft der Verlauf einer Herzrhythmusstörung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass neben normalen Herzschlägen (N) mit einer Frequenz von ca. 60 bpm (1 Herzschlag pro Sekunde) zusätzliche Herzschläge mit Ursprung in den Herzkammern auftreten (Ventrikuläre Extrasystolen V). Sie zeichnen sich durch eine erhöhte Amplitude im EKG (3 mV im Vergleich zu 1 mV bei den normalen Systolen) und einer sprunghaft erhöhten Herzfrequenz von ca. 120 bpm (2 Herzschläge pro Sekunde) aus. Bei verstärktem Auftreten kann die Pumpfunktion des Herzen aufgrund einer zu hohen Herzfrequenz und einer unphysiologischen Ausbreitung der elektrischen Erregung zum Erliegen kommen (ventrikuläre Tachyarrhythmie, ggf. Kammerflimmern). Des Weiteren äußert sich eine erhöhte Anzahl an Extrasystolen meist in einem Abfall des Blutdrucks, da die Pumpleistung des Herzen absinkt [134][57]. Eine Erkennung von Arrhythmien ist im EKG möglich. Hierbei wird vor allem auf Morphologie der Schläge, u.a. die starke Überhöhung der Amplituden, sowie eine schlagartige Veränderung der Herzfrequenz geachtet.

Zu den genannten Pathologien sowie weiteren kardiovaskulären Befunden gibt es Ansätze, die eine automatisierte Erkennung anhand der Morphologie des EKG-Verlaufs verfolgen [148]. Die Qualität dieser Verfahren ist allerdings stark abhängig von der Güte der aufgezeichneten EKG-Signale. Die für den Einsatz im Fahrzeug geforderte kontaktlose Aufzeichnung des EKG wird die benötigte Signalgüte mit den heutigen Hardware-Voraussetzungen nicht erreichen.

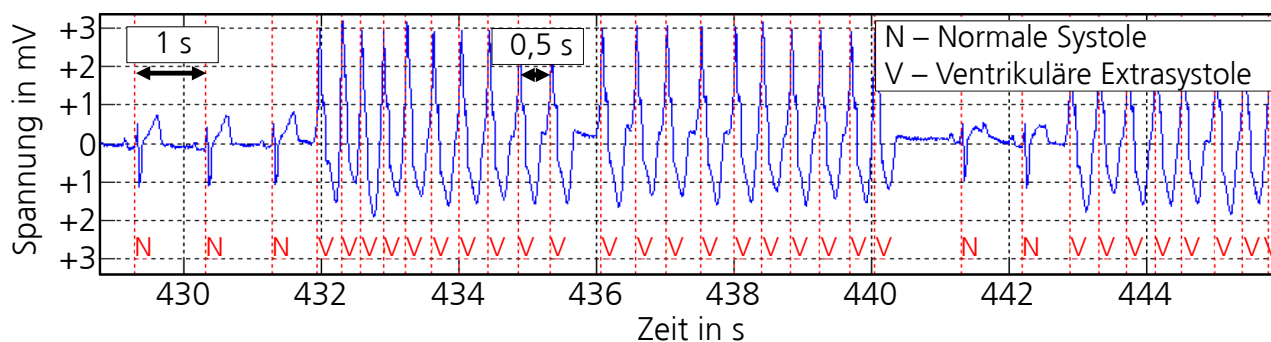


Abbildung 4-6: EKG-Verlauf bei Herzrhythmusstörungen (Ventrikuläre Extrasystolen) (nach [134])

Die Herzrate und speziell die Herzratenvariabilität sind zwar nicht der klinische Standard zur Diagnose für die genannten Pathologien, sie besitzen allerdings einen engen Zusammenhang zu diesem. Eine Erfassung im Auto erscheint darüber hinaus heute bereits möglich. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf die Herzratenvariabilitätsanalyse eingegangen.

Detektionsmöglichkeiten anhand der Herzratenvariabilität

Neben der Analyse der EKG-Morphologie gibt es weitere Verfahren, die einen Rückschluss auf kardiovaskuläre Erkrankungen zulassen. So ist es z. B. möglich, anhand des Verlaufs der Herzrate HR und deren Variabilität (Herzratenvariabilität HRV) Erkrankungen zu erkennen. Die Nutzung der HR und HRV ist insbesondere von Interesse, wenn Messungen eine geringe Signalqualität aufweisen, da lediglich der Zeitpunkt der Herzschläge verwendet wird [55]. Des weiteren ist es prinzipiell möglich, Pathologien bereits vor deren Eintreten anhand von Entwicklung in der HRV zu erkennen, was im Kontext von Nothalteassistenzsystemen von besonderem Interesse ist.

Unter der Herzratenvariabilität versteht man die Veränderung der zeitlichen Intervalle zwischen einzelnen Herzschlägen (RR-Intervalle), die üblicherweise anhand der Zeitpunkte der R-Zacken im EKG bestimmt wird (Abb. 4-7). Ein gesundes Herz weist eine im EKG sichtbare Variabilität auf. Einschränkungen dieser Variabilität können auf Krankheiten hindeuten. Die Schwankung der HRV unterliegt bereits beim gesunden Menschen einer Vielzahl von Einflüssen, wie bspw. dem Geschlecht, Alter und Trainingszustand einer Person. Allerdings haben auch dynamischere Faktoren wie die Atmung, die Tageszeit, der Hormonhaushalt oder Stress einen Einfluss [25].



Abbildung 4-7: Grundlage zur Berechnung der HRV sind die RR-Intervalle

In der Literatur wurde bereits gezeigt, dass durch eine Auswertung der HRV im Zeit- oder Frequenzbereich eine automatisierte Erkennung von kardiovaskulären Notfällen möglich ist. In der

Arbeit von Gamero et al. [41] wird bspw. untersucht, ob koronare Ischämien durch eine HRV-Analyse im Frequenzbereich erkennbar sind. In Abb. 4-8 sind der Verlauf der RR-Intervalle sowie der zeitliche Verlauf der Leistung im Bereich von 0,125-0,5 Hz dargestellt.

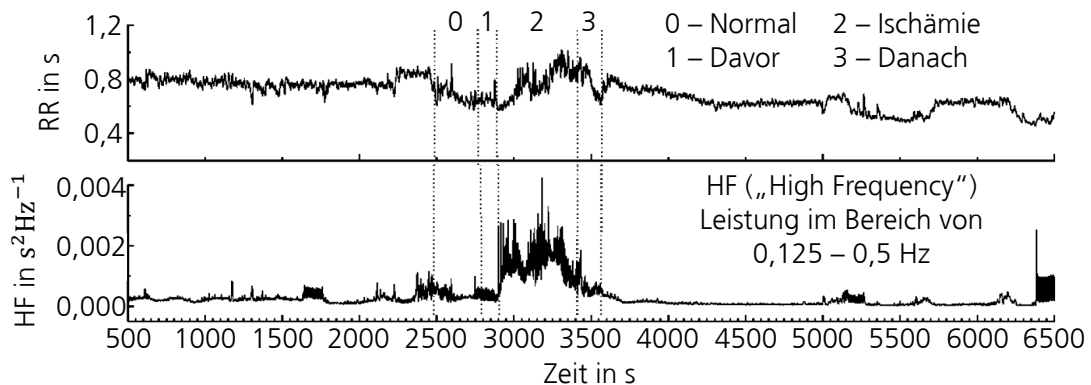


Abbildung 4-8: Verlauf der RR-Intervalle sowie die Leistung HF im Bereich von 0,125-0,5 Hz während einer Ischämie (nach [41])

Zum Zeitpunkt der Ischämie (Bereich 2) ist eine deutliche Erhöhung im Leistungsdichtespektrum erkennbar, die mit dem Eintreten der lebensbedrohlichen Ischämie korreliert. Dieser Effekt basiert auf der körpereigenen Regulation der Herzfrequenz,⁵ deren Veränderung auch beim Auftreten von ischämischen Durchblutungsstörungen nachgewiesen wurde. Von Gamero wird des Weiteren bestätigt, dass die Erkennung von Ischämien auch bei Fällen funktioniert hat, bei denen im Vorfeld keine typischen Schmerzen im Brustbereich (Angina Pectoris) aufgetreten sind (sogenannte stille Ischämie).

Auch bezüglich der Detektion und sogar Prädiktion von Arrhythmien konnte der Nutzen der HRV belegt werden. Insbesondere im Kontext implantierbarer Kardiofibrillatoren besitzen Ansätze zur Prädiktion größte medizinische Relevanz, da durch ein frühzeitiges Eingreifen unter Umständen Schocks vermieden werden können. So zeigen beispielsweise Mani et al. in diesem Kontext Veränderungen von Frequenzbereichsparametern der HRV vor ventrikulärer Tachyarrhythmien [77]. Wessel et al. [139] und Baumert et al. [11] konnten wiederum Veränderungen in nicht-linearen Parametern der HRV vor ventrikulären Arrhythmien nachweisen.

Weitere Informationen zur automatisierten Erkennung eines plötzlichen Herzstillstands sowie Arrhythmien finden sich in Literaturübersichten wie [75] oder [3].

⁵Das autonome Nervensystem des Körpers lässt sich in die Bestandteile des sympathischen und des parasympathischen Nervensystems einteilen, die für die Erhöhung und Senkung der Herzfrequenz zuständig sind [31].

4.3 Stand der Technik zur kontaktlosen Messung von EKG-Daten im Fahrzeug

Zuvor wurde gezeigt, dass die im Fahrzeug relevanten kardiovaskulären Notfälle wie der Herzinfarkt oder Arrhythmien im EKG erkennbar sind. Im folgenden Kapitel wird auf den Stand der Technik zur kontaktlosen Messung von EKG-Daten eingegangen und damit einhergehend die Verwendbarkeit im Fahrzeug betrachtet.

Prinzipiell ist es denkbar, dass medizinische Notfälle im Fahrzeug auch anhand von Symptomen erfasst werden können, die nicht direkt im EKG messbar sind. So ist es z. B. wahrscheinlich, dass der Körper des Fahrers zusammensackt oder die Bedienhandlungen nachlassen, was mit entsprechender Innenraumsensorik erkennbar ist. Eine reine Detektion dieser Merkmale ist allerdings hinsichtlich der Verarbeitungsdauer und Klassifikation ungenügend. So ist entweder die Erkennungsdauer der Notfälle zu lang oder die Anzahl an Fehlauslösungen zu hoch. Die Fusion dieser Informationen mit EKG-Daten kann allerdings zu einer erhöhten Robustheit beitragen.

Im Folgenden werden Sensoren vorgestellt, die eine Erkennung von kardiologischen Vitaldaten im Fahrzeug ermöglichen können (In Anlehnung an [57]). Die Auswahl wurde im Vorfeld auf nicht-invasive Sensoren beschränkt, die den Fahrer nicht von seiner Fahrtätigkeit ablenken und aus Komfortgründen möglichst kontaktlos bzw. minimal kontaktgebunden im Fahrzeug verbaut werden können (gemäß den Anforderungen in Kap. 2).

Kapazitive EKG-Messung

Die kapazitive EKG-Messung funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie das klassische EKG, mit dem Unterschied, dass die Elektroden nicht am Körper befestigt werden, sondern lediglich ein Kontakt zwischen Elektrode und Körperoberfläche hergestellt wird. Es wurde nachgewiesen, dass dieses Verfahren auch bei verschiedenen Kleidungsschichten sowie bei Relativbewegungen der beiden Kontaktflächen funktionieren kann [99].

Aleksandrowicz et al. [6] und Eilebrecht et al. [36] haben Elektroden in das Obermaterial eines Bürostuhls integriert (2 Elektroden an der Sitzlehne, 1 Bezugselektrode auf der Sitzfläche). Es wurde gezeigt, dass die Herzschläge (Zeitpunkt der QRS-Komplexe) in Ruhe messbar sind. Der Erhalt der Morphologie gegenüber dem Standard-EKG konnte allerdings nicht nachgewiesen werden, da Artefakte die Messsignale verfälscht haben. Es wurde insbesondere ein Einfluss der Kleidungsstärke sowie von Bewegungen des Probanden gezeigt. Diese Erkenntnisse bestätigten sich, nachdem der Aufbau in einer Studie mit 30 Personen getestet wurde [26]. Gleichzeitig wurde prognostiziert, dass eine Erkennung von Arrhythmien denkbar ist. Lim hat einen ähnlichen Aufbau für Anwendungen im Büro untersucht und ebenfalls Schwächen bei Bewegungen nachgewiesen [73].

Auch eine Integration der Sensoren in einen Fahrzeugsitz hat ähnliche Ergebnisse erzielt [6]. So wurde ein Einfluss von Fahrzeugbewegungen auf die Signalqualität nachgewiesen, der sich mit

ansteigender Geschwindigkeit verstärkt [71]. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Chamadiya et al. [20][21], die kapazitive Elektroden im Rahmen des Förderprojekts INSITEX untersucht haben [91]. Hierbei wurde zusätzlich ein Temperatureinfluss durch die Sitzheizung nachgewiesen. In weiterführenden Arbeiten wird untersucht, ob sich die Einflüsse von Bewegungsartefakten durch die Messung von Relativbewegungen des Körpers reduzieren lassen [102][124].

Ballistokardiographie

Die Ballistokardiographie ist eines der ältesten Verfahren (Mitte 19. Jahrhundert) zur minimal kontaktgebundenen Bestimmung der Herzaktivität. Es basiert auf der Messung von Kräften, die während der Zirkulation des Blutes durch den Blutkreislauf entstehen [102]. Aktuell werden primär EMFi-Sensoren (Electromechanical Film) verwendet, die aus mehreren geladenen Schichten Polypropylen bestehen und durch mechanischen Druck Schwankungen in ihrer elektrischen Ladung aufweisen [5][62].

Zur mobilen Messung der Herzrate wurde bereits anhand von Rollstühlen gezeigt, dass mit diesem Verfahren die Herzfrequenz messbar ist, so lange die Anzahl an Bewegungsartefakten begrenzt ist [109]. Es bestehen Ansätze, bei denen durch zusätzliche Beschleunigungssensoren externe Bewegungsartefakte ermittelt werden, um eine Verbesserung der Signalgüte zu erhalten [65][9]. Somit ließen sich möglicherweise auch fahrbahninduzierte Schwingungen detektieren, um das Verfahren im Fahrzeug zu realisieren.

Radarbasierte Verfahren

Die radarbasierte Erkennung der Herzrate basiert auf dem Doppler-Effekt und misst die Bewegung der Körperoberfläche durch Blutausswurf und Atmung. Sie lässt sich in die zwei Gebiete Doppler-Sensoranwendung und Ultra-Wideband-Radar einteilen. Zu den Doppler-Anwendungen gehört die Fernfeld-Anordnung, bei der der Sensor nicht direkt am Körper, sondern bspw. am Armaturenbrett oder Lenkrad angebracht wird. Eine Messung der Herzrate ist möglich, allerdings wird die Qualität erheblich durch die Bewegung des Körpers beeinträchtigt [130]. Im Bereich der Nahfeld-Anordnungen haben Fletcher et al. einen Sensor untersucht, der direkt auf der Brust des Patienten oder auf der Kleidung appliziert werden kann. Die Signalqualität wird durch Bewegungsartefakte weniger beeinträchtigt [39]. Für den Einsatz von beiden Verfahren im Fahrzeuginnenraum gilt es allerdings, die biologische Langzeitwirkung der emittierten Sendeleistung zu untersuchen [57].

Magnetisch-induktive Methoden und Magnetokardiographie

Magnetisch-induktive Methoden basieren auf der Induktion von magnetischen Feldern im menschlichen Körper. Durch den Herzschlag verändert sich das Blutvolumen in bestimmten Bereichen des Körpers, so dass sich auch die Permeabilität (Magnetische Leitfähigkeit) dieser Bereiche verändert. Diese Veränderung erzeugt eine Induktion, die wiederum gemessen werden

kann [128]. Im Gegensatz dazu wird bei der Magnetokardiographie das vom Herzen verursachte Magnetfeld direkt gemessen [27]. Beide Verfahren befinden sich im Forschungsstadium. Es ist eine hohe Empfindlichkeit gegenüber sekundärer magnetischer Strahlungen im Fahrzeug zu erwarten [57].

Kamerabasierte Plethysmographie

Die kamerabasierte Plethysmographie ist ein optisches Verfahren zur Messung von Volumenschwankungen. Im klinischen Umfeld wird mit Ohr- oder Fingerklammern mithilfe von Infrarotlicht das Blutvolumen in den entsprechenden Gefäßen gemessen und daraus die mittlere Herzrate bestimmt (Photoplethysmographie). Die Messmethode wurde am MIT auf die farbkamerabasierte Messung der Herzrate im Gesichtsfeld erweitert [108]. Mittels Analysen im Frequenzbereich werden Intensitäten des reflektierten Lichts gemessen, die im Bereich des grünen Farbspektrums (480-560 nm) mit dem Herzschlag korrelieren. Ähnliche Verfahren kommen bereits in Endgeräten der Unterhaltungselektronik zum Einsatz [98]. Eine Anwendung dieses Verfahrens ist im Automotive-Bereich zum aktuellen Stand nicht bekannt, allerdings sind Qualitätseinflüsse durch Lichtschwankungen und Kopfbewegungen des Fahrers zu erwarten [113]. Aus wirtschaftlicher Sicht ergeben sich zudem Vorteile für die Verwendung dieses kamerabasierten Verfahrens, da der gleiche Sensor für weitere Anwendungen zur Fahrerezustandsüberwachung genutzt werden kann (z. B. Aufmerksamkeits- und Müdigkeitsüberwachung [94][53]).

Weitere Verfahren

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von weiteren Sensoren zur Messung von kardiologischen Vitalparametern in Fahrzeugen, die einen permanenten Kontakt zwischen den Handflächen und Elektroden oder das Anlegen von zusätzlichen Apparaturen voraussetzen.

Eine Möglichkeit zur direkten kontaktgebundenen Messung von Vitaldaten bieten die Handinnenflächen. Verschiedene Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Messung eines EKG über Elektroden am Lenkrad, die vom Fahrer berührt werden sollen [91][17][95][46]. Zur Erkennung von plötzlichen Notfällen erscheint diese Methode ungeeignet, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Fahrer während der gesamten Fahrt seine Handflächen an derselben Position behält. Eine Reduktion von Störeinflüssen lässt sich durch das Tragen einer EKG-Weste erzielen [119][55], wobei hierbei eine Einschränkung beim Trage- bzw. Fahrkomfort zu erwarten ist.

Eine weitere Möglichkeit zur Detektion von kardiovaskulären Notfällen bieten mobile implantierte Defibrillatoren (ICD), die bereits von geschätzt 120.000 Trägern verwendet werden und eine steigende Tendenz haben [66]. Sie sind in der Lage, Arrhythmien zu erkennen und ihnen mit gezielten Stromstößen entgegenzuwirken. Eine Kommunikationsschnittstelle zwischen einem ICD und dem NHA könnte verhindern, dass im Moment eines Eingriffs der Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug verliert [40].

Fazit

In Tab. 4-3 ist eine qualitative Gegenüberstellung der betrachteten Systeme dargestellt. Eine robuste Erkennung der EKG-Morphologie konnte bei keinem Verfahren nachgewiesen werden. Unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen ist aber eine Messung der Herzschlag-Zeitpunkte als Grundlage für eine Herzraten- und Herzratenvariabilitätsanalyse möglich.

Sensorik	Möglicher Verbauport	Artefaktanfälligkeit	Detektierbarkeit des Herzschlags	Kosten	Gesamt
Kapazitives EKG	Fahrersitz, Gurt	o	+	+	+
Ballistokardiographisch	Fahrersitz	-	+	o	o
Radar	Fahrersitz, Kombiinstrument	-	o	-	-
Magnetisch	Fahrersitz, Gurt	-	+	-	-
Farbkamera	Kombiinstrument	o	+	+	+
Kontakt-EKG	Lenkrad	++	++	o	+/++
Legende: sehr gut (++), gut (+), mittelmäßig (o), bedingt möglich (-)					

Tabelle 4-3: Bewertung kontaktloser und minimal kontaktgebundener Messverfahren zur Erfassung der Herzrate im Fahrzeug [57][80]

Insbesondere kapazitive Messverfahren bieten unter Umständen eine gute Möglichkeit zur Detektion von Herzschlägen bei geringen Bewegungen der Probanden. Allerdings ist zu erwarten, dass die Qualität der Ergebnisse mit zunehmender Anzahl an Kleidungsschichten abnimmt. Ballistokardiographische Anwendungen eignen sich derzeit nur zur stationären Messung von Vitaldaten. Fahrbahn- und fahrzeuginduzierte Schwingungen würden die Ergebnisse im Fahrzeug voraussichtlich zu stark korrumpieren. Radarbasierte Methoden bieten prinzipiell die Möglichkeit zur kontaktlosen Herzratenmessung, allerdings sind auch hier Artefakte durch Bewegungen zu erwarten. Zudem gilt es, den Einfluss der Radarstrahlung auf die Fahrzeuginsassen zu überprüfen. Magnetisch-induktive Verfahren sowie die Magnetokardiographie sind bislang im Vergleich zu den anderen Verfahren nur mit einem messtechnisch großen Aufwand zu realisieren. Erwartungsgemäß werden im Fahrzeug auftretende Magnetfelder die Qualität der Messung stark beeinflussen. Die Messung der Herzrate per kamerabasierter Plethysmographie stellt im Vergleich zu den anderen Verfahren eine wirtschaftliche Möglichkeit zur kontaktlosen Messung der Herzrate dar, zumal die dafür verwendete Kamera gleichzeitig für andere Funktionen verwendet werden kann. Die Signalqualität wird hierbei voraussichtlich durch die Bewegungen der zu erfassenden Gesichtspartie sowie durch veränderliche Lichtverhältnisse beeinflusst. Verfahren, bei denen der Fahrer Sensoren bewusst während der Fahrt berühren muss, bieten die beste Signalqualität. Ihr großer Nachteil sind aber die Komforteinbußen des Fahrers, die bei einer Markteinführung in Fahrzeugen zu Akzeptanzproblemen führen können.

4.4 Probandenstudie zur Evaluation zweier kontaktloser Verfahren

Ausgehend vom Stand der Technik zur kontaktlosen Detektion der Herzrate im Fahrzeug werden verhältnismäßig gute Ergebnisse mit kapazitiven Sensoren erzielt. Eine vielversprechende Alternative bieten kamerabasierte Plethysmographien, da sie voraussichtlich weniger anfällig bei fahrzeuginduzierten Schwankungen sind und nicht von der Art der Bekleidung beeinflusst werden.

Im Folgenden werden im Rahmen einer Probandenstudie ein kapazitives und ein kamerabasiertes Verfahren evaluiert. Hierfür werden im Vorfeld mögliche Störeinflüsse identifiziert und im Rahmen der Studie systematisch untersucht. Danach werden die Sensoren anhand ihrer gemessenen mittleren Herzrate verglichen, um eine qualitative Aussage über die Stärken und Schwächen der Sensoren zu treffen. Für eine Analyse der Herzratenvariabilität wird eine Bestimmung der tatsächlichen Zeitpunkte der Herzschläge durch die zu evaluierenden Sensoren benötigt, was aufgrund der messtechnischen Randbedingungen zum Zeitpunkt der Studie nicht möglich war. Eine valide Erkennung der mittleren Herzrate bietet allerdings die Grundlage für eine spätere Bestimmung der HRV. Als Referenz wird ein 3-Kanal-EKG verwendet. Hierfür wird ein Messstand („Sitzkiste“) verwendet, der einem Fahrzeuginnenraum nachempfunden ist (vgl. Abb. 4-9). Die Daten der zu überprüfenden Sensoren (kapazitives EKG, kamerabasierte Plethysmographie) sowie des Referenz-EKG werden synchron aufgezeichnet. Über zwei Bildschirme erhalten die Probanden während der Studie Instruktionen zu verschiedenen Bedienhandlungen, die die Signalqualität der Sensoren gezielt beeinflussen sollen (z. B. Bedienung des Radionavigationssystems RNS). Die Beschreibung der Versuchstechnik sowie die damit erzielten Ergebnisse werden sinngemäß aus [79] übernommen und ergänzt.

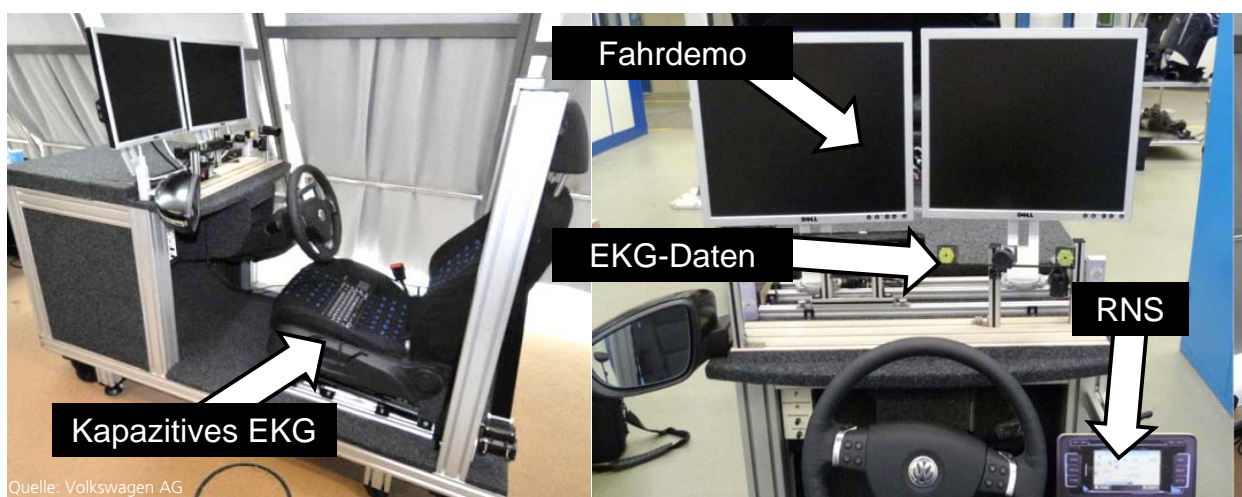


Abbildung 4-9: Messaufbau („Sitzkiste“) für die Probandenstudie (aus [79])

4.4.1 Sensoren und Algorithmen

Kapazitives EKG (cEKG)⁶

Das im Rahmen der Studie verwendete kapazitive EKG (Vergleiche Abb. 4-10) besteht aus 8 kapazitiven Elektroden, die in den Sitzbezug eines Fahrzeugvordersitzes integriert sind. Die Elektroden sind an eine Auswerteeinheit (EKG-Box) angeschlossen, die die Potentialdifferenzen zwischen den einzelnen Elektroden berechnet (Ableitungen) und die Daten vor der Weitergabe an einen PC filtert. Es werden insgesamt 7 bipolare Ableitungen gegenüber einer Referenzelektrode mit einer Abtastrate von 500 Hz aufgezeichnet. Als Referenzelektrode wird die Elektrode 3 gewählt. Vorversuche haben ergeben, dass die Messungen dieser Elektrode tendenziell weniger von der Bewegung des Probanden beeinflusst werden, während die oberen Elektroden durch die Bewegung des Oberkörpers und die unteren Elektroden durch die Bewegung der Beine beeinflusst werden können. Diese These gilt es im Rahmen der Probandenstudie zu verifizieren.

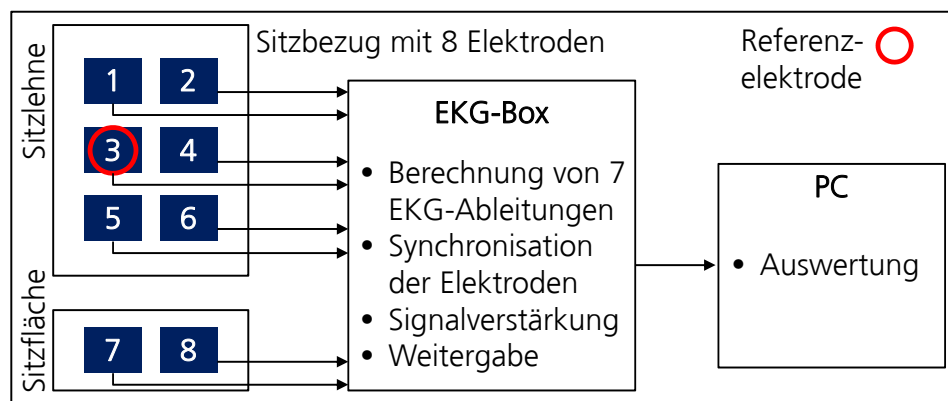


Abbildung 4-10: Messaufbau des kapazitiven EKG [79]

Die Ermittlung der mittleren Herzrate $HR_{\text{mean,cEKG}}$ des kapazitiven EKG basiert auf der Erkennung von Herzschlägen (Zeitpunkte des QRS-Komplex, vgl. Kap. 4.2.1) in den 7 bipolaren Ableitungen. Interindividuelle⁷ sowie intraindividuelle⁸ Schwankungen der Signalqualität einzelner Ableitungen machen eine Sensordatenfusion notwendig, um valide Aussagen zur mittleren Herzrate treffen zu können. Ziel ist es, aus den QRS Detektionen in den einzelnen Ableitungen zu einer Konsensusdetektion zu gelangen. Die QRS-Detektion in den einzelnen Kanälen basiert auf einer Wavelet Transformation, die das Signal ähnlich einer Kurzzeit-Fourier-Analyse in Frequenzanteile zerlegt und die Herzschläge anhand von charakteristischen Merkmalen (Extremwerte) des transformierten EKG-Signals erkennt [72]. Zur Fusion der 7 Ableitungen werden die QRS-Detektionen der Einzelkanäle anhand eines Gütemaßes bewertet. Dieses Gütemaß wird für

⁶Capazitive electrocardiogram (zu Deutsch: Kapazitives Elektrokardiogramm).

⁷Schwankungen in der Signalqualität einer Ableitung zwischen verschiedenen Probanden. Mögliche Ursachen: Körpergröße, Haltung, Art der Bekleidung.

⁸Schwankungen in der Signalqualität einer Ableitung innerhalb einer Aufnahme. Mögliche Ursachen: Variierende Sitzposition, Bewegung des Probanden während der Aufnahme.

jeden Kanal online anhand seiner Standardabweichung über verschiedene Zeiträume (10 s und 1 s) berechnet und entscheidet darüber, wie stark der Kanal bei der Bestimmung der Konsensusdetektion berücksichtigt wird. Überschreitet die Standardabweichung eine bestimmte Schwelle, wird ein Kanal zu bestimmten Zeitpunkten ggf. gar nicht berücksichtigt. Die mittlere Herzrate $HR_{\text{mean, cEKG}}$ ergibt sich aus einer Medianbildung der Zeitabstände zwischen den Herzschlägen (RR-Intervalle) über 10 s. Eine ausführliche Beschreibung der QRS-Detektion sowie der Datenfusion der Einzelableitungen ist in [79] zu finden.

Kamerabasierte Messung der Herzrate (Plethysmographie)

Als zweites Verfahren wird eine kamerabasierte Plethysmographie verwendet, mit der im klinischen Umfeld mithilfe von Finger- und Ohrklammern Veränderungen des Blutvolumens im Gewebe gemessen werden und daraus die mittlere Herzrate ermittelt wird.

In Poh et al. [108] wird dieses Verfahren verwendet, um mithilfe einer Farbkamera den Herzschlag aus dem reflektierten Licht des Gesichtsfelds zu bestimmen. Bei Betrachtung der Farbkanaäle ist feststellbar, dass im Vergleich zu anderen Wellenlängen der Grünanteil des reflektierten Lichts besonders stark mit der Durchblutung der Gefäße korreliert, was auf eine stark absorbierende Wirkung des Hämoglobins (roter Farbstoff der Blutkörperchen) von Licht im grünen Farbspektrum schließen lässt (vgl. Abb. 4-11).

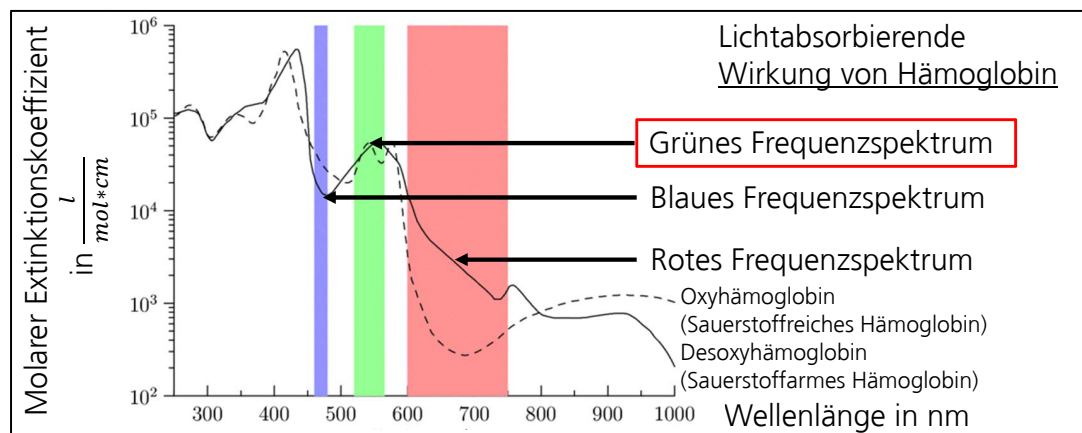


Abbildung 4-11: Extinktionskoeffizient (Schwächung elektromagnetischer Wellen durch ein Medium) des vom Gesichtsfeld reflektierten Lichts (in Anlehnung an [110])

Zur Erprobung dieses Verfahrens wird in der folgenden Studie eine Farbkamera der Firma IDS (Farbtiefe: 24 bit, mittlere Bildrate: 20 frames per second (fps), Auflösung: 752x480 Bildpunkte) verwendet. Die Verarbeitungskette der Kameraalgorithmen ist in Abb. 4-12 schematisch dargestellt.



Abbildung 4-12: Verarbeitungskette der kamerabasierten Plethysmographie (Legende: Independent Component Analysis (ICA), Fast Fourier Transform (FFT))

Zur Gesichtserkennung wird ein Algorithmus zur Kanten- und Flächendetektion⁹ verwendet, der verschiedene Gesichtspartien (Wangen, Stirn) verfolgt (Tracking) und die Grundlage zur getrennten Auswertung der Farbkanäle rot, grün und blau liefert. Zur Reduktion von Rauschanteilen und Artefakten wird eine Independent Component Analysis (ICA) durchgeführt, bevor mithilfe einer schnellen Fourier-Transformation (FFT) das Leistungsspektrum aller ICA-Komponenten über 12,8 s durchgeführt wird. Anhand des Kanals mit dem größten Peak wird die mittlere Herzrate der Kamera $HR_{\text{mean,cam}}$ bestimmt. Eine Ausführliche Beschreibung der Verarbeitungskette ist in [108] zu finden.

Referenz-EKG

Als Referenzmessverfahren wird ein EKG der Firma ADInstruments verwendet, welches die Daten mit einer Abtastfrequenz von 1000 Hz aufzeichnet. Zur Bestimmung der mittleren Herzrate eignet sich ein 3-Kanal-EKG (eine Ableitung). Hierfür werden Klebelektroden auf dem Thorax des Probanden appliziert (vgl. Abb. 4-13), was gegenüber Klemmelektroden an den Extremitäten (Handgelenk, Sprunggelenk) den Vorteil hat, dass die Messung weniger durch Bewegungsartefakte beeinflusst wird. Die Anordnung der Elektroden entspricht der Anordnung II nach Einthoven [101], in der die R-Zacke des QRS-Komplex gut zu erkennen ist, weil die elektrische Herzachse typischerweise in dieser Richtung verläuft (Abb. 4-13, rechts). Im aufgezeichneten EKG werden mithilfe einer automatisierten Herzschlagerkennung die Zeitpunkte der Herzschläge extrahiert und ggf. manuell korrigiert, woraus offline die mittlere Herzrate $HR_{\text{mean,ref}}$ in Fenstern von 12,8 s bestimmt wird.

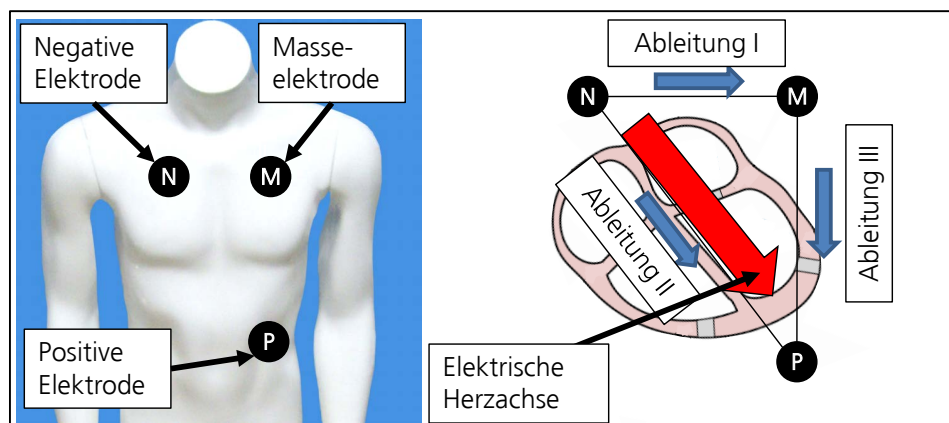


Abbildung 4-13: Applikationsort der Klebelektroden des Referenz-EKG

4.4.2 Identifikation von Störgrößen

Ziel der Studie ist es, die zu evaluierenden Sensoren gezielt auf Störeinflüsse zu testen, die während einer Fahrt im realen Fahrzeug auftreten können. Hierfür werden im Vorfeld Messfahrten durchgeführt, bei denen das Gesichtsfeld des Fahrers gefilmt wird. Die Fahrten werden

⁹Haar Feature based Cascade Classifier for Object Detection, openCV [133].

im urbanen Verkehr (Stadt), auf Landstraßen sowie Bundesautobahnen durchgeführt. Mögliche Einflussfaktoren auf die Qualität der Sensoren sind in Abb. 4-4 dargestellt. Diese lassen sich in Faktoren unterscheiden, die einerseits vom Fahrzeug und der Umgebung und andererseits vom Fahrer selbst ausgehen.

	Umwelteinflüsse/ Fahrzeugbewegungen	Durch den Fahrer induziert/beeinflusst	
		Fahrerbewegung	Fahrereigenschaft
Kamerabasiertes Verfahren	Lichteinflüsse: - Sonneneinstrahlung - Streulicht - Dunkelheit Fahrzeugbewegung: (siehe unten)	Kopfbewegungen: - Beobachtung des Umfelds (Abbiegevorgang) - Schulterblick - Blick auf Instrumente, Radio	- Hautfarbe - Gesichtsbehaarung - Brillenträger - Kopfbedeckung
Kapazitives EKG	Fahrzeugbewegung: - Kurvenfahrt - Beschleunigungs- und Bremsvorgänge - Unebene Fahrbahn	Körperbewegung: - Bedienung Fußpedallerie - Lenkbewegung - Schaltvorgänge / Bedienung des Radios - Schulterblick	- Art der Bekleidung (Material) - Kleidungsschichten - Dielektrische Wirkung (Transpiration)

Tabelle 4-4: Störgrößen bei kontaktloser und kamerabasierter Herzratenmessung (nach [79])

Die kamerabasierte Messung wird hauptsächlich durch die Erkennbarkeit der relevanten Gesichtspartien (Stirn, Wangen, Hals) sowie von den Lichtverhältnissen beeinflusst. Starkes Gegenlicht (Gegenverkehr, tiefstehende Sonne) sowie Lichtmangel (Dunkelheit) beeinträchtigen die Qualität genauso wie sich dynamisch verändernde Lichtverhältnisse (Tunneleinfahrt, Allee-fahrt). Außerdem wird das Tracking der relevanten Gesichtspartien durch Bewegungen des Kopfes, die primär durch die Überwachung des Verkehrsraums (Schulterblick, Blick in Spiegel) oder durch Blicke auf Bedienelemente im Fahrzeuginnenraum entstehen, beeinflusst. Verdeckungen der Stirn- und Wangenpartien im Gesicht durch Brillen oder Kopfbedeckungen verringern die Fläche, anhand der der Herzschlag ermittelt werden kann.

Das kapazitive Verfahren wird hauptsächlich durch Relativbewegungen zwischen dem Fahrer und den Elektroden sowie durch die Art des dazwischenliegenden Dielektrikums (Kleidung) beeinflusst. Fahrerbewegungen können einerseits durch dynamische Bewegungen des Fahrzeugs (Kurvenfahrt, Brems- und Beschleunigungsvorgänge, unebene Fahrbahn) verursacht werden. Andererseits wird die Qualität auch durch aktive Bewegungen des Fahrers beeinflusst, wenn durch Schaltvorgänge oder durch die Bedienung der Pedaleinheit der Kontakt zu einzelnen Elektroden unterbrochen wird. Das Dielektrikum zwischen der Hautoberfläche und den Elektroden wird maßgeblich durch die Art und Dicke der Bekleidung beeinflusst. Dicke bzw. vielschichtige Bekleidung besitzt üblicherweise eine hohe relative Permittivität¹⁰ und verschlechtert die Messbarkeit der elektrischen Signale. Elektrostatische Effekte durch synthetisches Kleidungsmaterial

¹⁰Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder.

sowie Körpertranspiration können zudem zu Kurzschlusseffekten zwischen einzelnen Elektroden führen.

4.4.3 Versuchsplan und Probandenkollektiv

Ausgehend von der zuvor beschriebenen Identifikation der Störgrößen wird ein Versuchsplan erstellt, in dem zunächst Messungen unter Idealbedingungen aufgenommen und anschließend Störgrößen systematisch appliziert werden. Das Ziel ist der Nachweis von Abhängigkeiten zwischen Störgrößen und Qualitätsmerkmalen der aufgenommenen Herzraten. In Tab. 4-5 ist der Versuchsplan der Studie dargestellt. Primäres Ziel ist die Untersuchung von Bewegungs- und Lichteinflüssen. Die Gesamtdauer der Messung beträgt 27 Minuten pro Proband. Genauere Informationen zu den applizierten Störgrößen, dem zeitlichem Ablauf und den Probandeneigenschaften sind in Anhang A.2 zu finden.

Nr.	Abschnitt	Länge	Beschreibung
0	Einführung und Adaption	3 min	Informationen über die Studie, Eingewöhnung an den Messstand, Übungsdurchlauf der Szenarios
1	Ruhephase	3 min	Ideale Messbedingungen: Proband bewegt weder Kopf noch Körper
	Ruhephase + Lichtartefakte	3 min	
2	Passive Bewegung	3 min	Körper- und Kopfbewegungen werden durch ruckartige Impulse in der Sitzkiste hervorgerufen
	Passive Bewegung + Lichtartefakte	3 min	
3	Aktive Bewegung	3 min	Der Proband führt Bewegungen eines Fahrmanövers aus (Abbiegen, Schulterblick, Überholen)
	Aktive Bewegung + Lichtartefakte	3 min	

Tabelle 4-5: Ablauf der Probandenstudie (nach [79])

Vor dem Beginn der Studie werden Klebeelektroden auf dem Oberkörper der Probanden platziert und die Messtechnik angeschlossen. Im Anschluss daran werden nach einer allgemeinen Einführung die verschiedenen Phasen der Studie erklärt und es erfolgt ein Übungsdurchlauf der Fahrmanöver, die auf den Monitoren angezeigt werden (Phase 0 - „Einführung“). Ziel dabei ist es, im Anschluss daran möglichst fahrzeugnahe Bewegungen der Probanden zu erzielen. Abschnitt 0 wird bei der Evaluation der Sensoren nicht berücksichtigt. Nach der abgeschlossenen Einführung folgen drei Phasen, die sich durch die Art der provozierten Bewegungsartefakte unterscheiden. Außerdem wird jede der Phasen unter Zuschaltung von Lichtartefakten wiederholt.

Der erste Abschnitt (Phase 1 - „Ruhephase“) stellt eine Messung unter idealen Bedingungen dar. Die Probanden bewegen dabei weder Kopf noch Körper. Im zweiten Teil dieses Abschnitts („Ruhephase + Lichtartefakte“) werden zusätzlich Lichtartefakte mit einer Halogenlampe erzeugt, die auf das Gesicht des Probanden ausgerichtet ist. Dieser verbleibt dabei weiterhin in

Ruhe. Die Lichtartefakte werden dabei wie folgt variiert: Lichtimpulse (Dauer < 1 s), konstantes Ein- und Ausschalten mit 1 Hz bzw. 2 Hz (Ablauf der Lichtartefakte, siehe Anhang A.2).

In Abschnitt 2 („Passive Bewegung“) werden Fahrbahnunebenheiten durch ruckartige Impulse simuliert, die durch den Versuchsleiter in Form von Stößen in den Messaufbau einleitet werden. Dabei werden ruckartige Bewegungen des Oberkörpers sowie Nickbewegungen des Kopfes erzielt. Der Abschnitt „Passive Bewegungen“ wird hierfür in zwei Abschnitte (jeweils 90 s, zusammen 3 min) unterteilt, in dem zunächst Einzelimpulse mit einer Pause von 6 s (Simulation einer Autobahnfahrt) und anschließend kontinuierliche Impulse mit einer Pause < 1 s (Simulation einer Fahrt auf Kopfsteinpflaster) eingeleitet werden (Ablauf der eingeleiteten Impulse, siehe Anhang A.2). Im Anschluss daran wird der gesamte Ablauf wiederholt, wobei dieses Mal zusätzlich die oben beschriebenen Lichtartefakte zugeschaltet werden.

Im dritten und letzten Abschnitt („Aktive Bewegung“) wird eine Stadtfahrt simuliert, bei der der Fahrer aktiv das Fahrzeug bewegt. Die Szenarien werden dem Probanden kontinuierlich auf zwei Bildschirmen angezeigt. Für die Absolvierung der Fahrmanöver (Anfahren, Abbiegen, Fahrstreifenwechsel, Bedienung des Navigationssystems) sind die Probanden angehalten, möglichst realistische Abläufe durchzuführen, was z. B. die Einhaltung eines Schulterblicks vor dem Abbiegen einschließt. Alle Probanden durchfahren dabei dasselbe Szenario (Ablauf der Fahrmanöver, siehe Anhang A.2). Im Anschluss daran wird dasselbe Fahrprofil ebenfalls in Kombination mit den Lichtartefakten wiederholt.

Das Probandenkollektiv umfasst 27 Probanden (22 männlich/5 weiblich, im Alter von 20 bis 46 Jahren, Durchschnittsalter 27,11 Jahre, Standardabweichung 4,81 Jahre). Nach Angaben der Probanden sind keine kardiovaskulären Vorerkrankungen bekannt. Die Probanden werden gebeten, dicke Oberbekleidung (Jacken) sowie Kopfbedeckungen abzulegen. Ansonsten werden bezüglich der Art und des Materials der Bekleidung keine Vorgaben gemacht, um eine zufällige Verteilung von Probandeneigenschaften zu erhalten. Für die spätere Einflussanalyse der Störgrößen und eine mögliche Korrelation mit der Signalqualität werden bestimmte Eigenschaften der Probanden erhoben:

- Geschlecht, Alter, Körpergewicht, Körpergröße
- Anzahl der Kleidungsschichten, Material der Bekleidung: Baumwolle, Synthetische Stoffe (in %)
- Bartträger, Brillenträger

Eine Übersicht der Probandeneigenschaften ist in Anhang A.2 dargestellt.

4.4.4 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Probandenstudie dargestellt. Zunächst werden die Ergebnisse der kapazitiven und kamerabasierten Herzratenmessung getrennt vorgestellt, bevor anschließend ein Vergleich der Messverfahren durchgeführt wird.

Ergebnisse der kapazitiven EKG-Messung (cEKG)

Zur Auswertung der Ergebnisse des cEKG wird zunächst gezeigt, welche Verbesserung durch die in Kap. 4.4.1 beschriebene Sensordatenfusion (Mehrkanaldetektion) gegenüber den 7 einzelnen Messungen (Einkanaldetektion) erzielt wurde. Im Anschluss daran werden die mittleren Herzraten des cEKG betrachtet.

Die Ergebnisse der kapazitiven Messung sind in Abb. 4-14 dargestellt. Auf der Ordinate ist als Vergleichsmaß die Fehlannotationsrate FAR_{cEKG} für alle drei Phasen ohne Lichtartefakte aufgetragen. Die Fehlannotationsrate FAR_{cEKG} berechnet sich zu:

$$FAR_{\text{cEKG}} = \frac{FN + FP}{R} = \frac{FN + FP}{TP + FN} \quad (4.1)$$

Hierbei wird die Summe der nicht erkannten Herzschläge (false negative FN) und der Anzahl der falsch erkannten Herzschläge (false positive FP) auf die Anzahl der tatsächlichen Herzschläge bezogen (Referenzherzschläge R). Die Referenzherzschläge R setzen sich wiederum aus der Summe der richtig erkannten Herzschläge (true positive TP) und FN zusammen. Die Anzahl der korrekten Herzschläge liefert das Referenz-EKG. Übersteigt die Summe aus FN und FP den Wert von R , kann FAR_{cEKG} Werte von über 100 % einnehmen.

Es werden über alle drei Phasen („Ruhephase“, „Passive Bewegung“, „Aktive Bewegung“) die Werte von FAR_{cEKG} für alle 27 Probanden berechnet. Für jeden Probanden $P_i \in \{P_1, P_2, \dots, P_{27}\}$ und alle Kanäle $C_j \in \{C_1, C_3, \dots, C_7\}$ werden zunächst die Werte der Einkanaldetektionen $FAR_{\text{cEKG},i,j}$ (blaue Sterne) aufgetragen. Aus diesen Werten ergibt sich durch eine Mittelwertbildung über alle Kanäle die mittlere Fehlannotationsrate $FAR_{\text{cEKG},\text{mean},i}$ (blaue Punkte). Die Ergebnisse der Mehrkanaldetektion $FAR_{\text{cEKG},\text{multi},i}$ (rote Punkte) werden aufgetragen, um die Verbesserung gegenüber den Einkanaldetektionen aufzuzeigen. Es ist zu erkennen, dass in über 85 % der Fälle durch die Mehrkanaldetektion geringere Fehler als durch die Einkanaldetektion erzielt werden ($FAR_{\text{cEKG},\text{multi},i} < FAR_{\text{cEKG},\text{mean},i}$).

Desweiteren werden für alle drei Phasen die Mittelwerte von $FAR_{\text{cEKG},\text{mean},i}$ und $FAR_{\text{cEKG},\text{multi},i}$ über alle Probanden gebildet, um die Phasen untereinander vergleichen zu können ($\overline{FAR}_{\text{cEKG},\text{mean}}$, $\overline{FAR}_{\text{cEKG},\text{multi}}$). In Tab. 4-6 sind die Ergebnisse für alle drei Phasen dargestellt. Da das cEKG nicht durch Lichtartefakte beeinflusst wird, werden die Phasen mit Lichtartefakten zunächst nicht betrachtet. Es ist zu erkennen, dass der mittlere Fehler sowohl bei den Einkanaldetektion $\overline{FAR}_{\text{cEKG},\text{mean}}$ als auch bei der Mehrkanaldetektion $\overline{FAR}_{\text{cEKG},\text{multi}}$ mit Zunahme der

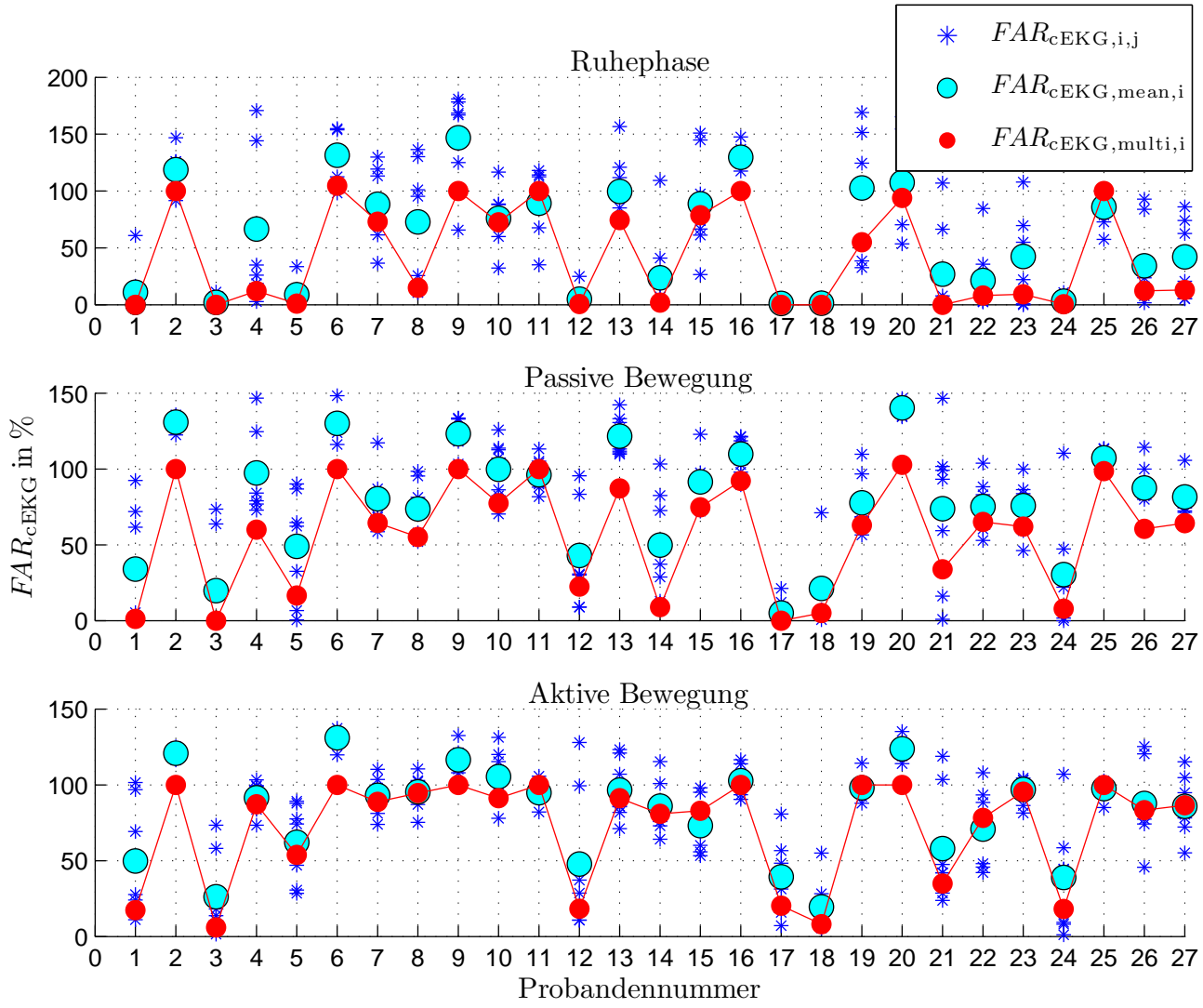


Abbildung 4-14: Vergleich der Fehlannnotationsraten FAR_{cEKG} des kapazitiven EKG zwischen der Einkanal- und Mehrkanaldetektion in allen drei Phasen ohne Lichtartefakte (Fehlannnotationsrate der Einkanal-detectionen ($FAR_{cEKG,i,j}$), deren Mittelwerte über alle 7 Kanäle ($FAR_{cEKG,mean,i}$) und das Ergebnis der Mehrkanaldetektion ($FAR_{cEKG,multi,i}$))

Bewegungsartefakte steigt. Allerdings ist der mittlere Fehler der Mehrkanaldetektion bei allen drei Phasen kleiner als der der Einkanaldetektion.

Für den Vergleich zwischen Einkanal- und Mehrkanaldetektion wird ein mittlerer Fehler $\overline{FAR}_{cEKG,diff}$ berechnet, der dem über alle Probanden gemittelten Absolutfehler zwischen Einkanal- und Mehrkanaldetektion in der jeweiligen Phase entspricht (vgl. Gleichung 4.2).

$$\overline{FAR}_{cEKG,diff} = \frac{\sum_{i=1}^{27} |FAR_{cEKG,mean,i} - FAR_{cEKG,multi,i}|}{27} \quad (4.2)$$

$\overline{FAR}_{cEKG,diff}$ ist ebenfalls in Tab. 4-6 angegeben. Es bestätigt sich, dass in allen Phasen trotz teilweise starker Bewegungsartefakte eine Verbesserung durch die Fusion der Einkanalinformationen erzielt wird ($\overline{FAR}_{cEKG,diff}$ in allen drei Phasen $> 10\%$). Die anhand von Vorversuchen aufgestellte These, dass Elektrode 3 (vgl. Abb. 4-10) die geringsten Bewegungsartefakte aufweist und somit am geeignetsten zur Verwendung als Referenzelektrode ist, wurde nicht be-

Fehler (in %)	Ruhephase	Passive Bewegung	Aktive Bewegung
$\overline{FAR}_{\text{cEKG,mean}}$	60,3	78,7	81,8
$\overline{FAR}_{\text{cEKG,multi}}$	41,7	56,4	71,8
$ \overline{FAR} _{\text{cEKG,diff}}$	20,4	22,6	12,1

Tabelle 4-6: Durchschnittliche Verbesserung der Herzschlagerkennung ($|\overline{FAR}|_{\text{cEKG,diff}}$) durch die Mehrkanaldetektion ($\overline{FAR}_{\text{cEKG,multi}}$) im Vergleich zur Einkanaldetektion ($\overline{FAR}_{\text{cEKG,mean}}$)

stätigt. Die Elektroden im Schulter- und mittleren Rückenbereich (Elektroden 1-4) wurden im Vergleich zu den Elektroden im Lendenbereich und auf der Sitzfläche (Elektroden 5-8) stärker von Bewegungseinflüssen beeinflusst. Den differenzierten Einfluss unterschiedlicher Störgrößen auf einzelne Elektroden mit dem Ziel einer optimalen Referenzelektrode gilt es jedoch gesondert in einer Folgestudie zu untersuchen, die aufgrund des signifikanten Mehraufwands im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden konnte.

Im Anschluss an die Bewertung der Mehrkanaldetektion werden die mittleren Herzraten $HR_{\text{mean,cEKG}}$ des kapazitiven EKG verwendet, um sie mit den mittleren Herzraten des Referenz-EKG $HR_{\text{mean,ref}}$ zu vergleichen. Hierfür wird für jeden Probanden i die mittlere Differenz aus kapazitiver und Referenz-Herzrate $HR_{\text{diff,cEKG},i}$ über die n -Werte in der Phasendauer von 180 s gebildet:

$$HR_{\text{diff,cEKG},i} = \frac{\sum_{i=1}^n |HR_{\text{mean,cEKG},i} - HR_{\text{mean,ref},i}|}{n} \quad (4.3)$$

In Abb. 4-15 sind die Ergebnisse von $HR_{\text{diff,cEKG},i}$ für alle drei Phasen ohne Lichtartefakte („Ruhephase“, „Passive Bewegung“, „Aktive Bewegung“) dargestellt.

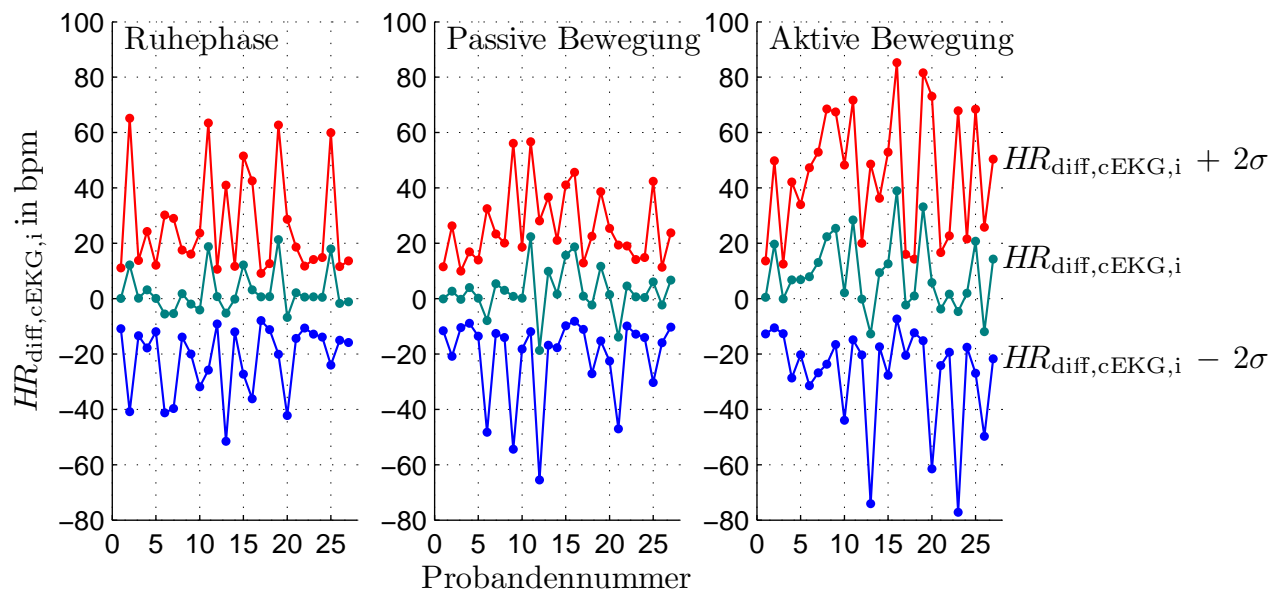


Abbildung 4-15: Mittlere Differenz aus cEKG- und Referenz-Herzrate $HR_{\text{diff,cEKG},i}$ für drei Phasen ohne Lichtartefakte (inkl. der doppelten Standardabweichung $\pm 2\sigma$)

Jeder Punkt entspricht einer Mittelung der Differenzen zwischen den ausgegebenen Herzraten des cEKG und des Referenz-EKG über 180 s. Neben den mittleren Abweichungen $HR_{\text{diff,cEKG},i}$ sind die Werte für die doppelten Standardabweichungen $\pm 2\sigma$ eingetragen. Dies entspricht dem Intervall, in dem über 95 % der Messungen erwartet werden.

Es ist zu erkennen, dass die kapazitive Herzschlagmessung in den Abschnitten „Ruhephase“ und „Passive Bewegung“ bis auf einige Ausreißer gute Ergebnisse ($HR_{\text{diff,cEKG},i} < 10$ bpm in ca. 80 % der Fällen) liefert. Erst im Abschnitt „Aktive Bewegung“ steigen die Werte von $HR_{\text{diff,cEKG},i}$ in über 40 % auf über 25 bpm an. Allerdings sind auch bei einigen Probanden in der Ruhephase hohe Differenzen aufgetreten ($HR_{\text{diff,cEKG},i} > 10$ bpm, vgl. Abb. 4-15 links, z. B. Probanden 2, 11, 16, 25), was auf Einflüsse durch die Art und Dicke der Bekleidung schließen lässt. Da die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Probandenstudie einen qualitativen Vergleich zwischen dem kapazitiven und dem kamerabasierten Messverfahren zum Ziel hatte, wurden keine systematischen Anforderungen an die Bekleidung der Probanden gestellt. Somit kann aufgrund der geringen Stichprobe für die zuvor genannten Ausreißer keine Korrelationen mit bestimmten Probandeneigenschaften nachgewiesen werden. Folgeuntersuchungen mit einer systematischen Variation der Bekleidung könnten Aufschlüsse über deren Einfluss ergeben.

Ergebnisse der kamerabasierten Herzschlagmessung (Plethysmographie)

Für die Auswertung der kamerabasierten Herzschlagmessung werden äquivalent zum kapazitiven EKG die von der Kamera ausgegeben Herzraten $HR_{\text{mean,cam}}$ (über eine Dauer von 12,8 s gemittelt) mit den mittleren Herzraten des Referenz-EKG $HR_{\text{mean,ref}}$ verglichen. Hierfür wird für jede Phase die mittlere Differenz aus Kamera- und Referenz-Herzrate $HR_{\text{diff,cam},i}$ über die n -Werte in der Phasendauer von 180 s gebildet (für alle Probanden i):

$$HR_{\text{diff,cam},i} = \frac{\sum_{i=1}^n |HR_{\text{mean,cam},i} - HR_{\text{mean,ref},i}|}{n} \quad (4.4)$$

In Abb. 4-16 sind die Ergebnisse von $HR_{\text{diff,cam},i}$ für alle drei Phasen ohne Lichtartefakte („Ruhephase“, „Passive Bewegung“, „Aktive Bewegung“) dargestellt. Außerdem wird der Messabschnitt „Ruhephase + Lichtartefakte“ beispielhaft für die Messphasen mit Lichtartefakten gezeigt.

Bei der kamerabasierte Herzschlagmessung wird in den Abschnitten „Ruhephase“ und „Passive Bewegung“ bis auf einige Ausreißer in über 90 % der Fälle ein Fehler $HR_{\text{diff,cam},i} < 10$ bpm erzielt. Erst in den Abschnitten „Aktive Bewegung“ und „Ruhephase + Lichtartefakte“ ergeben sich in über 40 % Werte von $HR_{\text{diff,cam},i} > 20$ bpm. Starke Abweichungen in den Phasen mit aktiven Bewegungen des Fahrers lassen sich dadurch erklären, dass bei bestimmten Bewegungen das Gesicht den Sichtbereich der Kamera kurzzeitig verlässt und so keine Messung mehr im Gesichtsbereich möglich ist. Für die Probanden mit großen Abweichungen in der „Ruhephase“ (Probanden 6, 21, 24) konnten keine Korrelationen mit bestimmten Probandeneigenschaften wie z.B. der Gesichtsbehaarung nachgewiesen werden.

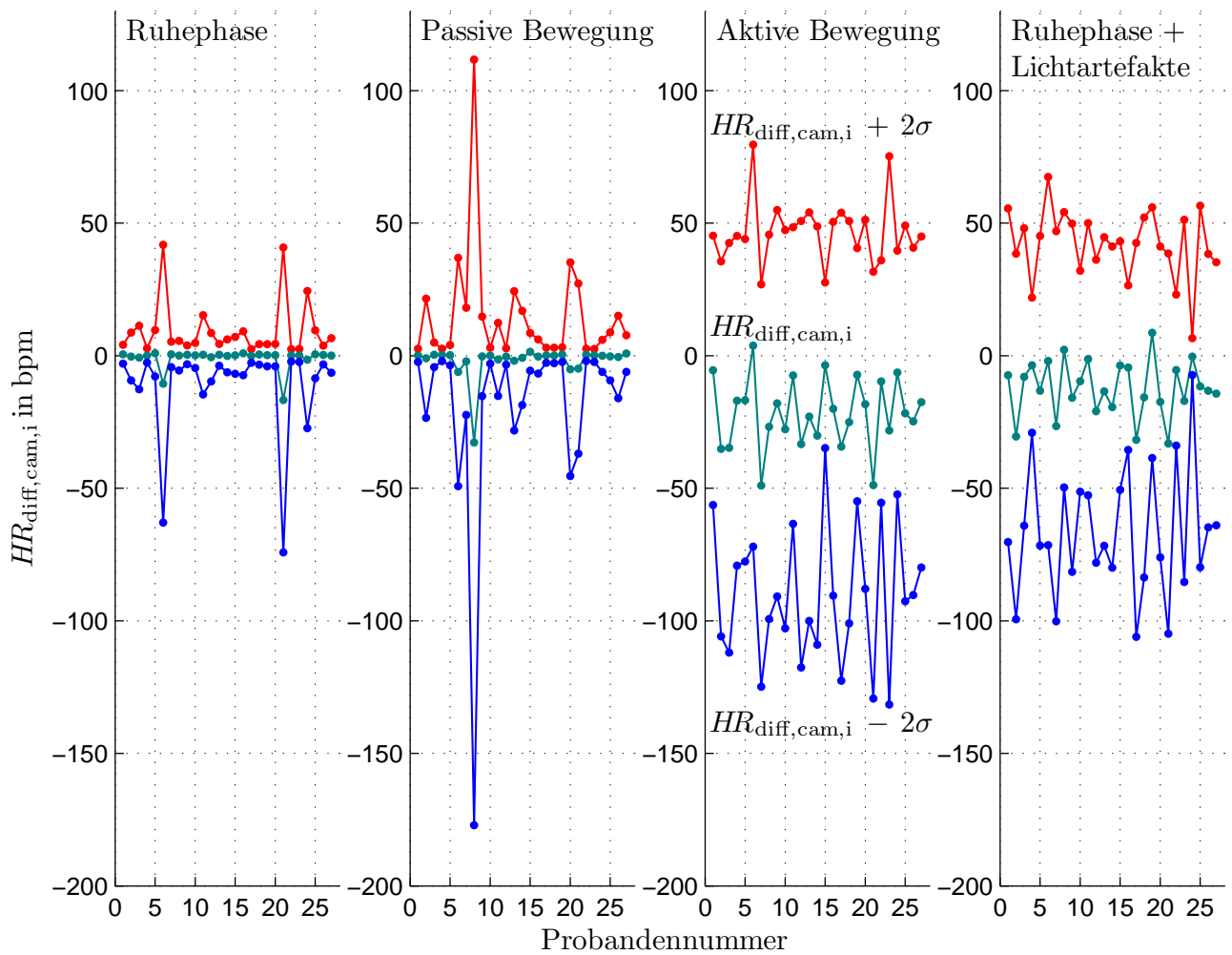


Abbildung 4-16: Mittlere Differenz aus Kamera- und Referenz-Herzrate $HR_{\text{diff,cam},i}$ für vier Messabschnitte (inkl. der doppelten Standardabweichung $\pm 2\sigma$)

Zur Betrachtung von Lichteinflüssen sind in Abb. 4-17 die kamerabasierte Herzrate $HR_{\text{mean,cam},21}$ sowie die Referenzmessung $HR_{\text{mean,ref},21}$ beispielhaft für den Probanden 21 in der Messphase 2 („Ruhephase + Lichtartefakte“) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei den Lichtimpulsen mit einer Pause von mind. 5 s die Messung kaum beeinflusst wird. Dies ändert sich, sobald das Licht mit einer konstanten Frequenz von 1 Hz bzw. 2 Hz variiert wird und lässt auf eine Anfälligkeit gegenüber dynamischen Lichtänderungen schließen.

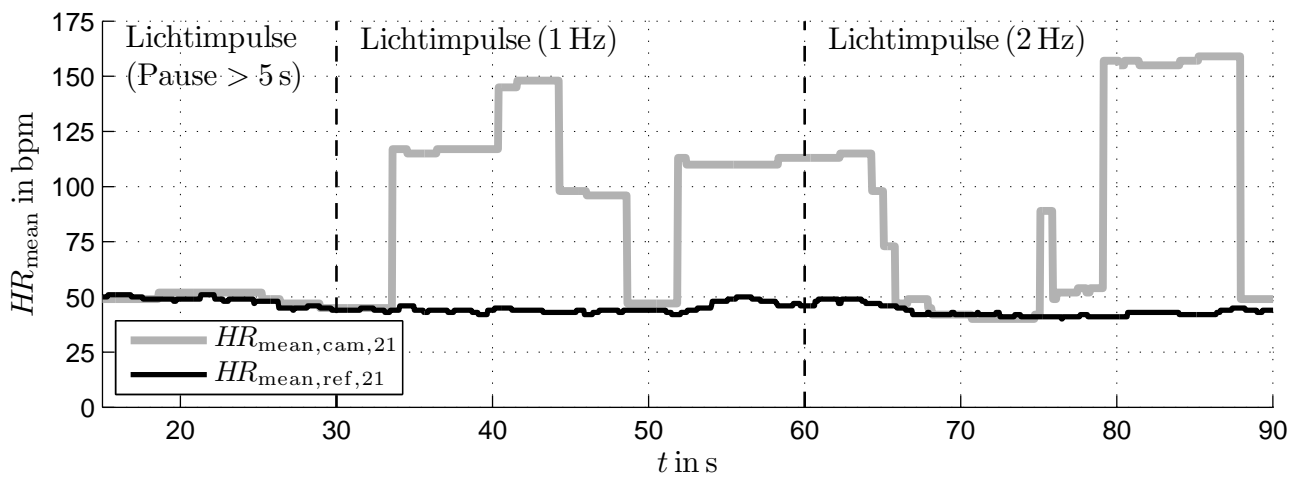


Abbildung 4-17: Verlauf der kamerabasierten Herzrate ($HR_{\text{mean,cam},21}$) und der Referenzherzrate ($HR_{\text{mean,ref},21}$) für den Probanden 21 in Phase 2 („Ruhephase + Lichtartefakte“)

Vergleich

Zum abschließenden Vergleich des kapazitiven und kamerabasierten Messverfahrens werden die mittleren Fehler zwischen Sensor- und Referenz-Herzrate über alle 27 Probanden berechnet ($\overline{HR}_{\text{diff,cEKG}}$, $\overline{HR}_{\text{diff,cam}}$). Der Gesamtfehler für das kapazitive EKG ergibt sich aus den zuvor berechneten Differenzen zwischen cEKG- und Referenz-Herzrate $HR_{\text{diff,cEKG},i}$ zu:

$$\overline{HR}_{\text{diff,cEKG}} = \frac{\sum_{i=1}^{27} HR_{\text{diff,cEKG},i}}{27} \quad (4.5)$$

Im nächsten Schritt wird äquivalent der Gesamtfehler für das kamerabasierte Messerverfahren $\overline{HR}_{\text{diff,cam}}$ über alle 27 Probanden berechnet:

$$\overline{HR}_{\text{diff,cam}} = \frac{\sum_{i=1}^{27} HR_{\text{diff,cam},i}}{27} \quad (4.6)$$

In Tab. 4-7 sind die Ergebnisse von $\overline{HR}_{\text{diff,cEKG}}$ und $\overline{HR}_{\text{diff,cam}}$ für alle Phasen dargestellt.

	Ruhephase		Passive Bewegung		Aktive Bewegung	
Lichtartefakte	nein	ja	nein	ja	nein	ja
$\overline{HR}_{\text{diff,cEKG}}$ in bpm	8,6 +	8,0 +	9,3 +	9,0 +	16,2 ○	14,9 ○
$\overline{HR}_{\text{diff,cam}}$ in bpm	3,5 +	21,0 -	5,5 +	25,0 -	28,0 -	40,5 -

Tabelle 4-7: Ergebnis der Probandenstudie: Mittlerer Fehler zwischen den zu evaluierenden Sensoren und dem Referenz-EKG für alle Phasen über alle Probanden (Herzrate des kapazitiven EKG: $\overline{HR}_{\text{diff,cEKG}}$, kamerabasierte Herzrate: $\overline{HR}_{\text{diff,cam}}$)

Es wird ersichtlich, dass das kamerabasierte Messverfahren insbesondere in den Abschnitten ohne oder mit wenig Bewegung im Vergleich zur kapazitiven Methode bessere Ergebnisse liefert (Ruhephase: 3,5 bpm gegenüber 8,6 bpm, Passive Bewegung: 5,5 bpm gegenüber 9,3 bpm). Dies liegt vor allem daran, dass die Position des Gesichtsfeldes durch kleine Schwankungen

wenig beeinflusst wird. Die Ergebnisse des cEKG liegen in diesen Phasen etwas darüber, was voraussichtlich am Einfluss der verschiedenen Kleidungsdecken und -materialien liegt. Außerdem genügen bereits geringe Schwankungen, um einen Einfluss in den Messungen des kapazitiven EKG zu bewirken.

Im Bereich der aktiven Bewegung ergeben sich geringe Vorteile bei der kapazitiven Messung, was vermutlich am unterschiedlichen Einfluss der Körperbewegungen des Fahrers auf die einzelnen Sensoren liegt (cEKG: 16,2 bpm, cam: 28,0 bpm). Während bei einem Schulterblick bereits das gesamte Gesichtsfeld des Probanden aus dem Sichtbereich der Kamera wandert, werden bei der kapazitiven Messung hauptsächlich die oberen Elektroden der Rückenlehne durch die Drehbewegung des Oberkörpers beeinflusst. Somit bietet das cEKG bei starken Kopfbewegungen tendenziell eine bessere Messqualität. Wie bereits zuvor angesprochen, ließe sich ggf. eine Verbesserung durch eine Veränderung der Referenzelektrode erzielen (Lendenbereich oder Sitzfläche). Eine Verbesserung der kamerabasierten Messung ist voraussichtlich durch robustere Algorithmen im Bereich des Gesichtsfeld-Trackings zu erwarten.

Im Bereich der Messungen mit Lichtartefakten hat die kamerabasierte Messung insbesondere bei schwachem und stark veränderlichem Licht an Qualität verloren. Eine Messung von externen Streulichteinflüssen könnte hierbei Abhilfe schaffen. So können externe Lichtschwankungen kompensierend in die Messung der vom Gesicht reflektierten Lichtstärke eingerechnet werden. Möglicherweise ist dies mithilfe der in einigen Fahrzeugen verbauten Kameras zur Detektion der Fahrstreifenmarkierungen möglich. Sie werden eingesetzt, um für Spurhalteassistenzsysteme die relative Fahrzeuglage zur Fahrstreifenmitte zu messen. Auch die Nutzung der Fotowiderstände in automatisch abblendenden Spiegeln ist zur Messung der Streulichteinflüsse denkbar.

Eine Sensordatenfusion der beiden Sensoren könnte für eine Anwendung im Fahrzeug die Stärken beider Sensorkonzepte nutzen, um Schwächen in bestimmten Bereich zumindest teilweise zu kompensieren. Externe Sensoren wie z. B. Beschleunigungssensoren oder Lichtmesser könnten Störeinflüsse durch Fahrzeugschwingungen oder Streulicht messen und die Informationen der einzelnen Sensoren so gewichten, dass Artefakte kompensiert werden.

4.5 Zusammenfassung

In Kap. 4 wurden gemäß den Anforderungen in Tab. 2-4 grundlegende Untersuchungen zur Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug anhand von kontaktlosen Sensoren durchgeführt. Ausgehend von den medizinischen Notfällen, die im Fahrzeug auftreten können, wurden Verfahren sowie die dazu gehörigen Messgrößen zu deren automatisierter Erkennung vorgestellt. In einem anschließenden Überblick über Sensoren, die sich für eine Detektion dieser Notfälle im Fahrzeug eignen könnten, wurden kapazitive sowie kamerabasierte Verfahren als

besonders vielversprechend identifiziert. Diese beiden Messprinzipien wurden im Rahmen einer Probandenstudie für den Einsatz im Fahrzeug evaluiert.

Zunächst wurde anhand von Studien zu Verkehrsunfällen herausgefunden, dass kardiovaskuläre, also das Herz oder die Gefäße betreffende, Notfälle voraussichtlich die Hauptursache für das Eintreten von medizinischen Notfällen am Steuer ausmachen. Dies wurde hauptsächlich anhand von Studien bestätigt, in denen Verkehrstote mit Verdacht auf medizinische Notfälle vor dem Eintreten des Unfalls obduziert wurden.

Im Anschluss daran erfolgte eine Einführung in die Erkennung von kardiovaskulären Notfällen. Am Beispiel der am häufigsten auftretenden kardiovaskulären Notfälle, dem Herzinfarkt und den Herzrhythmusstörungen, wurden Detektionsmöglichkeiten vorgestellt. Die klassische Detektion per EKG wurde um die Herzratenvariabilitätsanalyse ergänzt, die eine automatische Erkennung dieser Notfälle auch bei geringerer Signalqualität ermöglichen kann.

Anschließend wurden Sensoren für den Einsatz im Fahrzeug vorgestellt, die eine Herzratenmessung als Basis für eine Herzratenvariabilitätsanalyse ermöglichen. Kapazitive Verfahren sowie eine kamerabasierte Plethysmographie resultierten unter den Gesichtspunkten der Anwendbarkeit im Fahrzeug, der Artefaktanfälligkeit sowie der Wirtschaftlichkeit als meistversprechende Ansätze.

Im Rahmen einer Probandenstudie mit 27 Probanden wurden erstmalig ein kapazitives Verfahren (cEKG) samt Mehrkanalfusion und die kamerabasierte Plethysmographie für den Einsatz im Fahrzeug bewertet und verglichen. Als Referenz wurde ein 3-Kanal-EKG mit geklebten Elektroden verwendet. Hierfür wurden mögliche Störeinflüsse identifiziert und während der Studie gezielt untersucht. Es bestätigte sich die Erwartung, dass die Ergebnisse des kapazitiven EKG von den Bewegungen des Körper und der Art der Kleidung beeinflusst werden. Das kamerabasierte Verfahren wurde erwartungsgemäß von Lichtveränderungen und Kopfbewegungen beeinträchtigt. Allerdings ergaben sich auch Situationen, bei denen voraussichtlich durch eine Fusion der beiden Verfahren Qualitätsverbesserungen erzielbar sind. So wurde das kamerabasierte Verfahren schwächer von dynamischen Schwingungen beeinflusst. Im Gegensatz dazu hatten Kopfbewegungen einen geringeren Einfluss auf das kapazitive Verfahren, während beim kamerabasierten Verfahren im Extremfall das Gesichtsfeld nicht detektiert und somit keine Herzrate ermittelt werden konnte.

Hinsichtlich der Fragestellungen in Tab. 2-4 (Nr. 12, 16, 17) konnte bestätigt werden, dass eine manuelle Aktivierbarkeit des Systems insbesondere bei kardiovaskulären Notfällen sinngemäß ist, da Studien zufolge die Betroffenen in Einzelfällen das Eintreten der Notfälle bemerkt haben und sogar für eine bestimmte Zeit noch handlungsfähig waren. Für die Positionierung des Bedienelements ist zu berücksichtigen, dass auch andere Fahrzeuginsassen, insbesondere der Beifahrer, das System im Notfall aktivieren können, wenn sie einen medizinischen Notfall beim Fahrer erkennen. Hierfür bietet sich bspw. die Positionierung auf der Mittelkonsole an (vgl. Kap. 3.4.1). Zur Frage nach der Detektionsdauer eines medizinischen Notfalls konnten nur

Anhaltspunkte aus der Literatur extrahiert werden, da die automatisierte Detektion der Notfälle auch im klinischen Umfeld noch Bestandteil der Forschung ist. Allerdings kann über eine Eskalationsstrategie (vgl. Kap. 3.4.3) bei dem Verdacht eines medizinischen Notfalls eine entsprechende Teilautomatisierung aktiviert werden, die entweder vom Fahrer überstimmt wird oder nach Ablauf einer bestimmten Zeitspanne das NHA vollständig aktiviert. Die Fragestellung hinsichtlich einer versehentlichen Deaktivierung des NHA durch Krampfanfälle oder ein Zusammensacken des Fahrers über dem Lenkrad bedarf weiteren Analysen, da bislang keine ausreichend detaillierten Informationen zum Ablauf dieser Notfälle am Steuer verfügbar waren.

Ausblickend ist zu sagen, dass eine Verbesserung der betrachteten Sensoren erzielt werden kann, wenn Störeinflüsse gezielt untersucht werden. So ist es für das kapazitive Messverfahren notwendig, in Folgestudien den Einfluss verschiedener Kleidungsmaterialien, insbesondere hinsichtlich möglicher elektrostatischer Effekte, auf die Qualität des Messverfahrens einzeln zu untersuchen. Das kamerabasierte Verfahren hat insbesondere bei Lichteinflüssen Verbesserungspotenziale, was sich voraussichtlich durch eine externe Lichtmessung verbessern lässt.

5 Warnstrategien für ein kooperatives Fahrstreifenwechselmanöver

Nachdem in Kap. 4 die Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug betrachtet wurde, wird in diesem Kapitel der Fokus auf die Warnung der umliegenden Verkehrsteilnehmer nach der Auslösung eines NHA gelegt. Es wird der Forschungsaspekt betrachtet, ob Verkehrsteilnehmer durch gezielte Informationen motiviert werden können, ein Fahrzeug mit aktiviertem Nothalteassistenzsystem durch Vergrößerung der Sicherheitsabstände zu unterstützen. Insbesondere bei automatisch durchgeführten Fahrstreifenwechseln mit erhöhter Verkehrsdichte ist dieses kooperative Verhalten wünschenswert, da automatische Fahrmanöver in der Regel größere Freiräume benötigen. Im Rahmen einer Studie im Fahrsimulator werden vier verschiedene Warnstrategien untersucht, die gemäß den Anforderungen in Tab. 2-4 auf der Nutzung von serienmäßig verbauten Warnelementen basieren. Einleitend werden die Idee eines kooperativen Fahrstreifenwechsels und die psychologischen Grundlagen zur Situationserkennung und zu Aufmerksamkeitszuwendungen genauer betrachtet.

Die Ergebnisse zur Durchführung und Auswertung der Studie orientieren sich inhaltlich an den Arbeiten von Mirwaldt et al. [81] und Brouwer [18].

5.1 Grundlagen

5.1.1 Kooperativer Fahrstreifenwechsel

Ziel eines NHA ist es, das Fahrzeug nach dem Eintreten eines medizinischen Notfalls in einen risikominimalen Zustand zu überführen. In Kap. 3 wurde gezeigt, dass es für Straßen mit mehreren Fahrstreifen geeigneter erscheint, das Notfallfahrzeug auf einem Fahrstreifen in den Stillstand zu überführen, der sich in Fahrtrichtung möglichst weit rechts befindet. Diese Anforderung resultiert aus der Annahme, dass die zu erwartenden Relativgeschwindigkeiten zwischen Fahrzeugen geringer sind, je weiter rechts sich der Fahrstreifen befindet. Idealerweise eignet sich dafür der Seitenstreifen, falls er vorhanden ist. Im Falle einer physiologisch bedingten Fahrunfähigkeit des Fahrers gilt es, den Fahrstreifenwechsel inklusive eines Anhaltemanövers automatisiert vom Fahrzeug durchzuführen zu lassen.

Im Falle einer erhöhten Verkehrsdichte sind Situationen wahrscheinlich, in denen ein Fahrstreifenwechsel nach rechts durch andere Verkehrsteilnehmer erschwert wird oder ggf. für bestimmte Zeit nicht durchführbar ist, da sich keine geeigneten Verkehrslücken ergeben. Erschwerend kommt hinzu, dass für einen automatischen Fahrstreifenwechsel systembedingt weitere Anforderungen erfüllt sein sollten. In Kap. 3 wurden die notwendigen Voraussetzungen, insbesondere hinsichtlich der Sensoren zur Situationswahrnehmung und -interpretation, aufgezeigt. So gilt es sicherzustellen, dass andere Verkehrsteilnehmer und deren Zustände korrekt erkannt werden, um das automatische Fahrmanöver durchzuführen. Es ist zu erwarten, dass in Situationen mit erhöhter Verkehrsdichte die Verkehrslücken ggf. nicht die benötigte Größe aufweisen, um ein automatisiertes Fahrstreifenwechselmanöver durchzuführen (vgl. [35]).

Eine Möglichkeit zur Durchführung eines automatischen Fahrstreifenwechsels bei einer erhöhten Verkehrsdichte wurde von Schwarz und Decke [122] untersucht. Hierbei wurde der Ansatz verfolgt, dass sich Verkehrsteilnehmer im Allgemeinen kooperativ verhalten, wenn die Handlungsabsicht anderer Fahrzeuge erkennbar ist [13]. Es wurde im Rahmen einer Simulatorstudie untersucht, ob nachfolgenden Verkehrsteilnehmern die eintretende Notsituation vermittelt werden kann, um so ein kooperatives Verhalten zu erzielen. Das gewünschte Resultat war eine Vergrößerung des Abstandes zum Vorderfahrzeug und somit die Ermöglichung eines Fahrstreifenwechsels (vgl. Abb. 5-1).

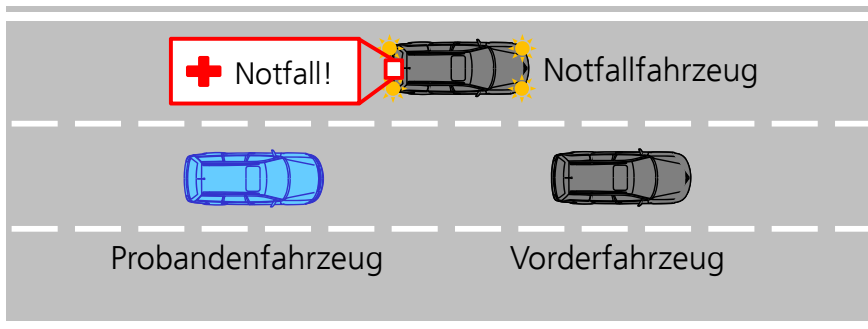


Abbildung 5-1: Versuchsszenario nach Schwarz und Decke zur Untersuchung von Warnstrategien für ein kooperatives Fahrstreifenwechselmanöver [122]

Neben einer auffälligen Schlangenlinienfahrt wurde ein zusätzliches Display in der Heckscheibe als Warnelement untersucht, in dem Informationen über den Zustand („Notfall“) des Notfallfahrzeugs sowie Handlungsaufforderungen angezeigt wurden („Bitte mehr Abstand!“). Die Ergebnisse zeigen, dass ein kooperatives Verhalten bei nachfolgenden Teilnehmern erzielbar ist. Allerdings wurde bei den Probanden in den wenigsten Fällen eine tatsächliche Assoziation mit der eigentlichen Ursache für den Fahrstreifenwechsel, nämlich dem Eintreten eines medizinischen Notfalls, erzielt.

5.1.2 Situationserkennung im Straßenverkehr

Die Grundlage für kooperatives Verhalten im Straßenverkehr ist eine korrekte Situationserkennung [13]. In Modellen zur menschlichen Informationsverarbeitung (Kognition) bildet die Situationserkennung die Grundlage für Entscheidungsprozesse. Die Modelle lassen sich in die Gruppen der sequentiellen und der Ressourcenmodelle unterteilen. Bei sequentiellen Modellen erfolgt die Verarbeitung von Reizen (Stimuli) nacheinander, so dass keine Parallelisierung stattfindet [137]. Ressourcenmodelle gehen von der Annahme aus, dass nur eine bestimmte Kapazität zur Verarbeitung von Informationen zur Verfügung steht, die situationsabhängig auf zu verarbeitende Reize aufgeteilt wird [141]. In der Literatur wird davon ausgegangen, dass kombinierte Modelle den menschlichen Informationsverarbeitungsprozess am besten abbilden [1].

Ein kombiniertes Modell wurde von Endsley [38] erstellt, in dem die Situationserkennung (Situation Awareness) beschrieben wird. In Abb. 5-2 ist die Verarbeitungskette des Modells abgebildet.

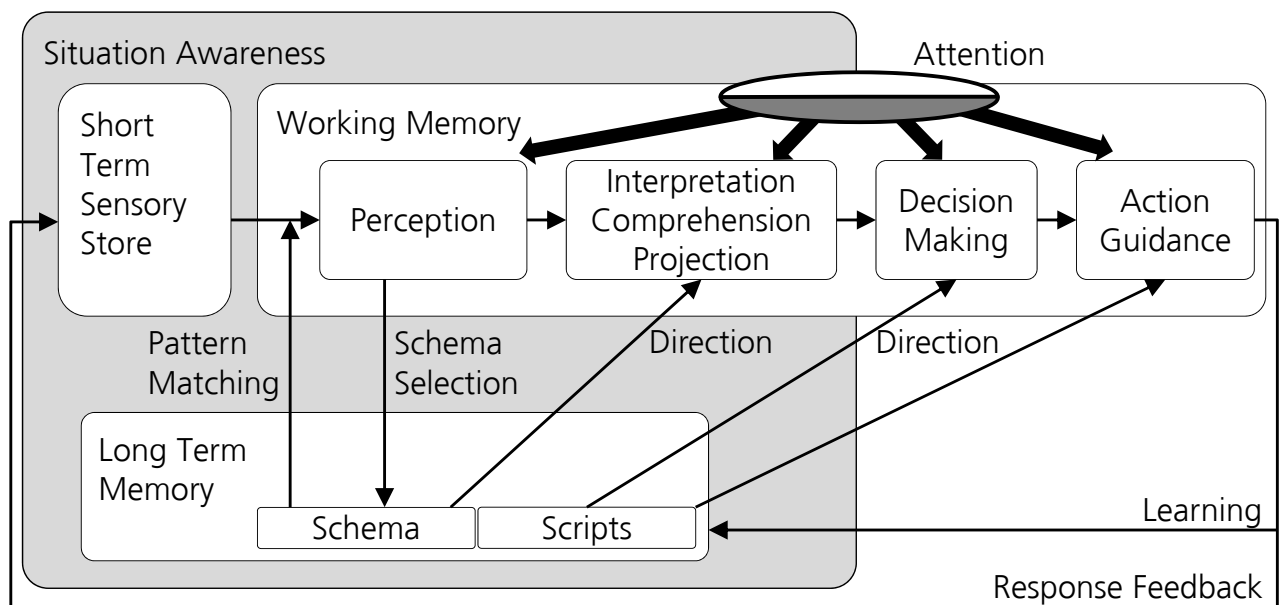


Abbildung 5-2: Informationsverarbeitungsprozess nach Endsley [38]

Im ersten Schritt der Informationsverarbeitung erfolgt eine Kurzzeitspeicherung der aufgenommenen Reize im sensorischen Gedächtnis (Short Term Sensory Store), bevor sie im Arbeitsgedächtnis (Working Memory) verarbeitet werden. In allen Arbeitsschritten der Informationsverarbeitung, d.h. der Situationswahrnehmung (Perception), Interpretation, Entscheidung (Decision Making) und Handlungsauswahl (Action Guidance) erfolgt ein Abgleich mit Wissen (Mustern, Schemata) aus dem Langzeitgedächtnis, was den Verarbeitungsprozess beschleunigen kann. Eine schnellstmögliche Handlungsauswahl erfolgt durch die Musterauswahl (Pattern Matching) zu Beginn der Informationsverarbeitung.

Neue Situationen erfordern einen höheren Verarbeitungsaufwand, da Situationen mit vorhandenem Wissen kombiniert (Interpretation) und für eine spätere Wiedererkennung gelernt (Learning) werden müssen. Endsley beschreibt des Weiteren, dass der gesamte Prozess von der Aufmerksamkeit (Attention) des Menschen beeinflusst wird, die wiederum stark von den individuellen Zielen in der jeweiligen Situation abhängt. Insbesondere in zeitkritischen Situationen wird häufig ein starker Fokus auf die Wiedererkennung von bekannten Mustern gelegt, um schnellst möglich zu einer Handlungsauswahl zu kommen, was auch zu Fehlern bzw. falschen Handlungen führen kann, da wenige Ressourcen zur Interpretation der neuen Informationen verwendet werden. So bleiben in zeitkritischen Situationen neue Informationszusammenhänge oft unberücksichtigt.

In der Arbeit von Barthelmess und Barthelmess [10] zur Verkehrskognition wird ein ähnliches Modell verwendet, um spezifisch die Informationsverarbeitung beim Führen von Fahrzeugen zu beschreiben (vgl. Abb. 5-3).

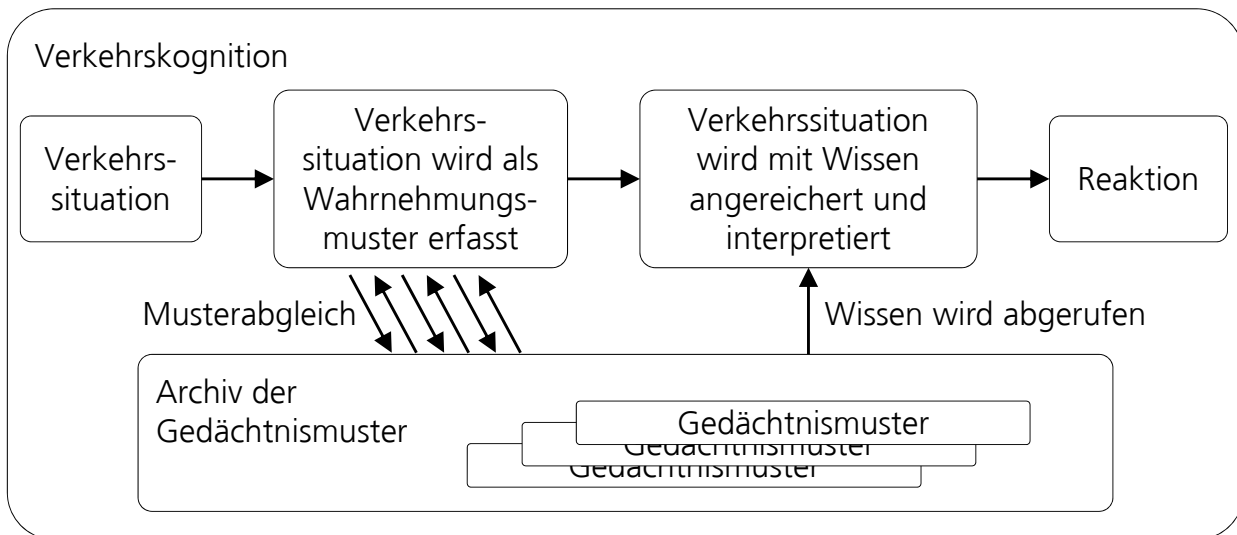


Abbildung 5-3: Modell zur Verkehrskognition nach Barthelmess et al. [10]

Demnach werden Verkehrssituationen anhand von bestimmten Merkmalen klassifiziert und mit bestehenden Gedächtnismustern verglichen. Dies führt zu einer starken Vorselektion der zu verarbeitenden Reize und bietet gleichzeitig eine Vorauswahl an durchführbaren Reaktionen. In Abhängigkeit des Erfahrungsschatzes werden die benötigten Ressourcen zur Informationsverarbeitung gesenkt und es bilden sich Rücklagen zur Durchführung von Nebenaufgaben oder zur Bewältigung von nicht vorhersehbaren kritischen Situationen.

Im Anwendungsfall des kooperativen Fahrstreifenwechsels für ein NHA ist zu erwarten, dass durch eine Verwendung von bekannten Warnelementen (Warnblinklicht, Fahrtrichtungsanzeiger) eine Notsituation und die damit verbundene Handlungsaufforderung besser erkannt werden als durch die Warnung mithilfe unbekannter Warnelemente. Dies liegt hauptsächlich daran, dass eine derartige Verkehrssituation bereits mentale Ressourcen zur Verkehrsbeobachtung und Fahrzeugführung beim Fahrer beansprucht. Somit verbleiben voraussichtlich wenige Ressourcen

zum Interpretieren von neuen Warnhinweisen. Ein Erlernen dieser Warnhinweise, z. B. im Rahmen der Fahrausbildung, erscheint ebenfalls als nicht zielführend, da diese Situation mit einer geringen Wahrscheinlichkeit auftritt und das erlernte Wissen durch die mangelnde Wiederholung in Vergessenheit geraten würde. Bei der Verwendung bekannter Warnelemente ist hingegen eine erhöhte Aufmerksamkeit seitens der Fahrer zu erwarten, da diese Gedächtnismuster bereits zum Führen der Fahrzeuge aktiviert werden.

5.1.3 SEEV-Modell für Aufmerksamkeitszuwendungen

Als wichtige Einflussgröße für eine korrekte Situationserkennung wurde zuvor die Aufmerksamkeit während des Informationsverarbeitungsprozesses identifiziert. Horrey et al. [56] haben ein Modell zur stochastischen Vorhersage von Aufmerksamkeitszuwendungen entwickelt. Entsprechend dem sogenannten SEEV-Modell kann die Wahrscheinlichkeit von Aufmerksamkeitszuwendungen für ein Zielobjekt anhand von vier Einflussgrößen bestimmt werden:

- Saliency (S): Eine hohe Sichtbarkeit und Auffälligkeit visueller Objekte fördern Aufmerksamkeitszuwendungen. Objekte mit hohen Kontrasten oder plötzlichen Bewegungen erhöhen die Auffälligkeit.
- Effort (Ef): Wahrnehmungsprozesse, die zu einer erhöhten physischen und mentalen Anstrengung führen, erschweren Aufmerksamkeitszuwendungen. Objekte, die große Augen- und Kopfbewegungen erfordern, werden weniger häufig betrachtet.
- Expectancy (Ex): Erwartungsgemäße Ereignisse im Gesichtsfeld fördern die Aufmerksamkeitszuwendung. Erwartete Veränderungen von Objekten und Bewegungen von Fahrzeugen werden häufig betrachtet.
- Value (V): Die Bedeutsamkeit von Ereignissen im Umfeld bezogen auf das eigene Zielverhalten fördert selektive Aufmerksamkeitsprozesse. Informationen, die das eigene Fahrverhalten beeinflussen, werden daher bevorzugt wahrgenommen.

Ereignisse mit einer hohen Auffälligkeit (S), deren Wahrnehmung mit einem geringen Aufwand (Ef) verbunden ist, werden mit einer hohen Wahrscheinlichkeit (P) wahrgenommen, insofern das Auftreten dieser Ereignisse erwartungsgemäß (Ex) und für die Verfolgung der eigenen Zielvorgaben von Bedeutung (V) ist ($P = S - Ef + Ex + V$). Das Modell hat sich zur Vorhersage der Blickzuwendungsfrequenz zu ortsbezogenen Informationen beim Autofahren und in der Luftfahrt bewährt [143][142].

5.2 Warnstrategien

Im Folgenden werden Möglichkeiten zur Warnung von Verkehrsteilnehmern untersucht, die kooperatives Verhalten bei anderen Verkehrsteilnehmern motivieren und die Durchführung eines

automatischen Fahrstreifenwechsels im Notfall unterstützen. Gemäß den Grundlagen zur Situationserkennung sollen im Unterschied zur Studie von Schwarz und Decke (vgl. Kap. 5.1.1) keine neuen Warnhinweise vom Fahrer gelernt, sondern bekannte Stimuli verwendet und kombiniert werden (z. B. Warnblinklicht, Fahrtrichtungsanzeiger). Somit wird eine Assoziation mit bekannten Gedächtnismustern angestrebt, was voraussichtlich zu einer guten Wahrnehmbarkeit sowie Situationsinterpretation führt und die Wahrscheinlichkeit der gewünschten kooperativen Handlung erhöht.

Zunächst wird ein Stand der Technik zu bekannten Warnstrategien mit dem Fokus auf kooperativen Fahrstreifenwechselmanövern im Verkehr vorgestellt, bevor vier verschiedene Warnstrategien ausgewählt und anschließend im Fahrsimulator untersucht werden.

5.2.1 Stand der Technik zu Untersuchungen von kooperativem Verhalten in Verkehrssituationen

Neben der von Schwarz und Decke [122] vorgestellten Studie zur kooperativen Fahrstreifenwechselvorgängen werden im Folgenden weitere Quellen betrachtet, in denen die Häufigkeit und die Ausprägungen von kooperativem Verhalten im Straßenverkehr untersucht wurden.

In der Arbeit von Ehmanns wurde das kooperative Verhalten von Verkehrsteilnehmern bei Fahrstreifenwechselvorgängen betrachtet [35]. Untersucht wurde, welchen Einfluss verschiedene Lichtsignale und Fahrmanöver auf das kooperative Verhalten haben. Insbesondere bei Fahrstreifenwechseln ohne sichtbare Motivation, wie z. B. am Ende eines Einfädelstreifens oder beim Auffahren auf ein Fahrzeug mit geringer Geschwindigkeit, ist das kooperative Verhalten der Verkehrsteilnehmer eingeschränkt. Es hat sich herausgestellt, dass das Setzen des Fahrtrichtungsanzeigers durch Fahrmanöver unterstützt werden kann, um ausreichend große Verkehrslücken für einen Fahrstreifenwechsel zu erzielen. So hatte beispielsweise das Anfahren der rechten Fahrbahnmarkierung im eigenen Fahrstreifen einen positiven Einfluss auf die Verkehrslücke auf dem rechten Zielfahrstreifen. Ebenso hat sich herausgestellt, dass sich das gezielte Anfahren der Lücken in Längsrichtung positiv auf die Kooperationsbereitschaft der anderen Verkehrsteilnehmer auswirkt, da so der Aufwand für andere Fahrzeuge zur Ermöglichung des Fahrstreifenwechsels reduziert wird.

Benmimoun et al. haben in verschiedenen Verkehrssituationen die Häufigkeit und die Motive für kooperatives Verhalten untersucht [13]. Neben Normalfahrern wurden Taxi- und Fernfahrer zu ihrem kooperativen Verhalten befragt. Es hat sich herausgestellt, dass die Ermöglichung von Fahrstreifenwechseln die häufigste Form von kooperativen Manövern ausmacht. Auch hierbei wurde bestätigt, dass eher kooperativ gehandelt wird, wenn das Manöver keine starken Verzögerungen des Verkehrsteilnehmers notwendig macht. Es hat sich zudem herausgestellt, dass eine Vielzahl von kooperativen Manövern durch Verständigungsschwierigkeiten scheitert, obwohl zunächst eine kooperative Absicht vorhanden war. Aus Sicht der Fernfahrer wurde eine

geringere Kooperationsbereitschaft der Verkehrsteilnehmer angegeben, was insbesondere auf die Gruppe der PKW-Fahrer zutrifft.

In der Arbeit von Mujcic und Frijters wurde anhand einer Stichprobe von 959 Situationen untersucht, wie kooperativ sich Verkehrsteilnehmer gegenüber Einscherern an Kreuzungen verhalten [85]. Es wurde betrachtet, ob Pendlern im Berufsverkehr (Brisbane, Australien) das Einscheren auf eine Hauptstraße ermöglicht wird, was ein Abbremsen der vorfahrtsberechtigten Verkehrsteilnehmer auf der Hauptstraße voraussetzt. Es hat sich herausgestellt, dass in 39,6 % der Fälle das Einscheren ermöglicht wurde, was von den Autoren als altruistisches Verhalten gewertet wird. Es hat sich des Weiteren gezeigt, dass das Geschlecht der Fahrzeugführer einen Einfluss auf das kooperative Verhalten hatte. So haben sich Fahrer gegenüber dem gleichen Geschlecht weniger kooperativ verhalten als gegenüber gegengeschlechtlichen Verkehrsteilnehmern. Dieser Effekt wurde verstärkt bei männlichen Fahrern beobachtet, die sich in der Situation befanden, Frauen das Einscheren zu gewähren.

Ellinghaus kommt zu ähnlichen Ergebnissen, nachdem er in einer Befragung die wahrgenommene Häufigkeit von partnerschaftlichen Verhaltensweisen im Straßenverkehr untersucht hat [37]. So beobachteten 45 % der befragten Personen, dass Fahrer auf ihre Vorfahrt verzichten, um anderen das Einfädeln in den fließenden Verkehr zu ermöglichen.

In Studien zu Aggressivität im Straßenverkehr wurde untersucht, wie häufig sich Verkehrsteilnehmer aggressiv verhalten und wie sich dieses Verhalten äußert. Herzberg und Schlag haben anhand einer Literaturrecherche ermittelt, dass ca. 50–60 % der befragten Verkehrsteilnehmer häufig aggressives Verhalten im Straßenverkehr beobachten [54]. Dieses äußert sich in der Regel durch erheblich verringerte Sicherheitsabstände, Geschwindigkeitsüberschreitungen und unerlaubtes Überholen auf dem rechten Fahrstreifen, aber auch durch eine signifikante Abnahme von kooperativem Verhalten gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern.

Zusammenfassend ist feststellbar, dass im Straßenverkehr im Allgemeinen eine Kooperationsbereitschaft vorhanden ist. Diese zeigt sich insbesondere bei der Gewährung von Fahrstreifenwechseln im fließenden Verkehr. Allerdings ist zu erkennen, dass ein Grund für den Fahrstreifenwechsel erkennbar sein muss, wie z. B. am Ende des eigenen Fahrstreifens, da sonst die Bereitschaft sinkt. Begünstigend wirkt sich eine deutliche Handlungsabsicht aus, die z. B. durch das Setzen des Fahrtrichtungsanzeigers, das Anfahren der Fahrstreifenmarkierung in Richtung des Zielfahrstreifens oder durch das gezielte Anfahren von Lücken erreicht wird. So wird ebenfalls die Wahrscheinlichkeit von Missverständnissen gesenkt, die eine Vielzahl von Situationen mit kooperativen Intentionen scheitern lassen.

5.2.2 Konzept der Warnstrategien

Im Folgenden werden Warnstrategien entwickelt, die anschließend im Fahrsimulator im Rahmen einer Probandenstudie untersucht werden. Für die Realisierung der Warnvarianten werden

Lichtfunktionen und Fahrmanöver kombiniert, da sie gemäß dem SEEV-Modell (vgl. Kap. 5.1.3) voraussichtlich die Aufmerksamkeitszuwendungen der anderen Verkehrsteilnehmer erhöhen. Das resultierende Kollektiv besteht aus insgesamt vier Warnvarianten. Dabei wird berücksichtigt, dass zur Umsetzung der Warnstrategien keine zusätzlichen Warnelemente am Fahrzeug installiert werden müssen.

Lichtfunktionen

Zur Analyse von möglichen Warnstrategien für nachfolgende Verkehrsteilnehmer auf Basis der Fahrzeugbeleuchtung werden serienmäßige Elemente der Rückleuchten betrachtet. Hierfür wird primär der Fokus auf die Bremsleuchten und die Fahrtrichtungsanzeiger gelegt. Schluss- und Nebelschlussleuchten sowie Rückstrahler erscheinen zur Umsetzung eines kooperativen Fahrstreifenwechselmanövers ungeeignet, da sie bereits sehr spezifische Aufgaben während des Fahrzeugbetriebs erfüllen.

Das Warnblinklicht dient zur Warnung anderer Verkehrsteilnehmer vor Gefahren. Dies ist z. B. bei der Annäherung an ein Stauende oder bei besonders langsamer Fahrgeschwindigkeit auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen der Fall. In Deutschland ist es vorgeschrieben, das Warnblinklicht beim Liegenbleiben von Fahrzeugen unverzüglich einzuschalten.¹ Ebenfalls ist es während eines Abschleppvorganges bei beiden Fahrzeugen zu aktivieren.² Schul- und Linienbusse müssen das Warnblinklicht einschalten, wenn sie sich einer Haltestelle nähern und solange Fahrgäste ein- oder aussteigen.³

In den meisten Ländern ist ein Fahrstreifenwechsel rechtzeitig und deutlich anzukündigen, was in der Regel durch das Setzen der Fahrtrichtungsanzeiger erfüllt wird.⁴

Die Bremsleuchten inklusive der dritten Bremsleuchte sind vorgeschrieben, um nach hinten die Betätigung der Betriebsbremse oder des Retarders anzuzeigen.⁵ Die Bremsleuchten und vor allem ihre Weiterentwicklung, das adaptive Bremslicht, werden außerdem zur Kennzeichnung von Notbremsungen als Kollisionswarnung verwendet.

In Abb. 5-4 werden verschiedene Lichtfunktionen anhand ihrer Auffälligkeit und ihres Informationsgehalts bewertet. Die Bewertung des Informationsgehalts erfolgt anhand der Assoziation des Warnelements mit den Informationen „Ankündigung eines Fahrstreifenwechsels nach rechts“ und der „Kennzeichnung einer Notsituation“. Es wird der Fahrstreifenwechsel nach rechts als Bewertungskriterium verwendet, da im Notfall ein Erreichen des Seitenstreifens bzw. eines Fahrstreifens möglichst weit rechts erwünscht ist.

Die Verwendung des Warnblinklichts ist das eindeutigste Merkmal zur Kennzeichnung einer Notfallsituation, wobei es im dichtem Verkehr ebenfalls zur Kennzeichnung eines Stauendes

¹ § 15 StVO.

² § 15a Abs. 3 StVO.

³ § 16 Abs. 2 StVO.

⁴ § 7 Abs. 5 StVO.

⁵ § 53 Abs. 2 StVO.

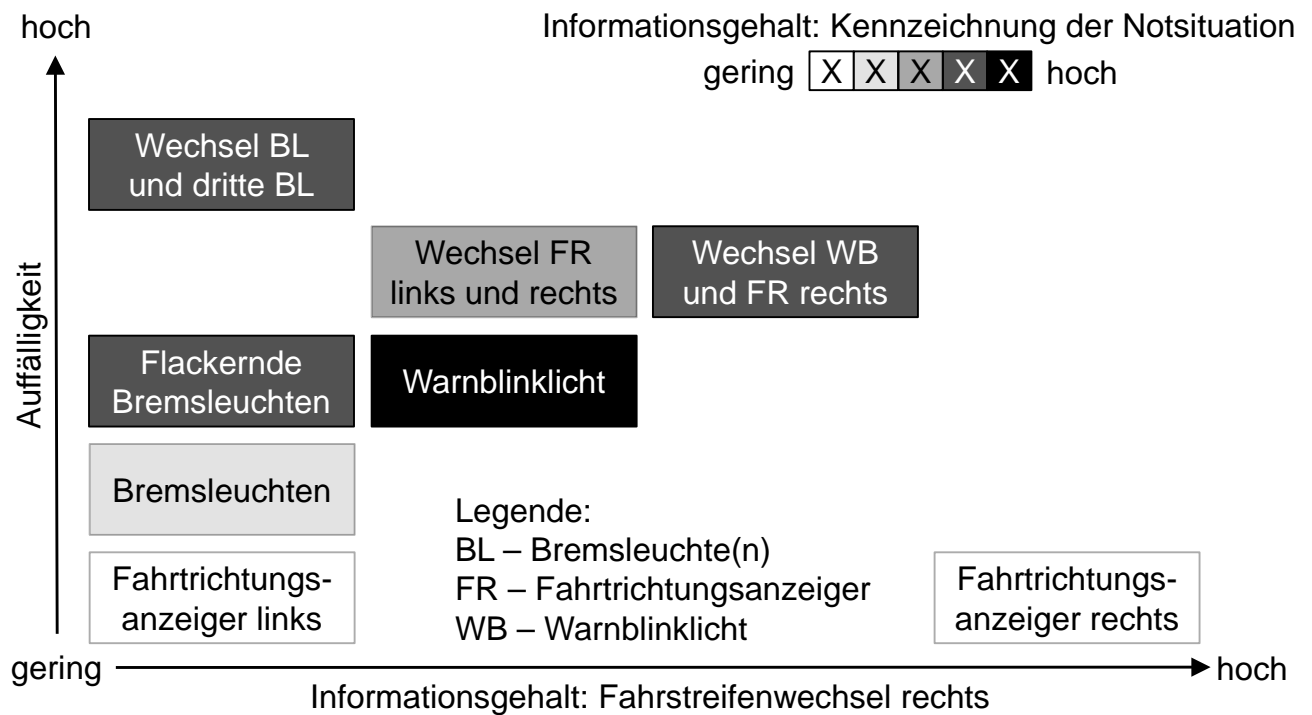


Abbildung 5-4: Bewertung von Lichtfunktionen anhand ihrer Auffälligkeit und Verständlichkeit [18]

verwendet wird und keine Aussage über einen Fahrstreifenwechsel liefert. Die alleinige Nutzung der Fahrtrichtungsanzeiger ermöglicht zwar die Kennzeichnung eines bevorstehenden Fahrstreifenwechsels, allerdings wird in keiner Weise eine Notsituation vermittelt. Somit wird eine geringe Auffälligkeit erzielt. Gleichermäßen wird voraussichtlich mit dem Ansteuern der Bremsleuchten eine Verzögerung assoziiert, allerdings lässt sich weder eine Notsituation noch ein bevorstehender Fahrstreifenwechsel dadurch kennzeichnen. Flackernde Bremsleuchten sind auffälliger und vermitteln durch ihre Assoziation mit NHA auch eine Gefahrensituation, allerdings wird ggf. so das Risiko von Auffahrunfällen bei nachfolgenden Verkehrsteilnehmern erhöht. Das abwechselnde Ansteuern der Fahrtrichtungsanzeiger kann zu einer Aufmerksamkeitszuwendung bei anderen Verkehrsteilnehmern führen, da möglicherweise eine ähnlich warnende Assoziation wie beim Warnblinklicht erzielt wird, wobei die Fahrstreifenwechselabsicht nicht direkt erkennbar ist. Eine vielversprechende Alternative wird durch die abwechselnde Ansteuerung des Warnblinklichts und des Fahrtrichtungsanzeigers rechts erzielt, da sowohl die Notsituation als auch der Fahrstreifenwechsel gekennzeichnet werden.

Fahrmanöver

Zusätzlich zu den Lichtfunktionen ist es denkbar, auffällige Fahrmanöver als Warnelemente zu verwenden. Möglich ist die Beeinflussung der Quer- und Längsbewegung des Fahrzeugs, solange das eigene und die umliegenden Fahrzeuge nicht gefährdet werden und die Manöver fahrphysikalisch realisierbar sind.

In Längsrichtung lassen sich Beschleunigungs- und Verzögerungsmanöver sowie Bremsrucke realisieren. Durch die Applikation von Lenkmomenten kann andererseits die Querverführung des

Fahrzeugs beeinflusst werden. Von Ehmanns [35] wurde bereits gezeigt, dass eine Annäherung an die Fahrstreifenmarkierung die Erkennung einer Fahrstreifenwechselintention verstärken kann, noch bevor der Fahrtrichtungsanzeiger gesetzt wurde. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass der eigene Fahrstreifen nicht verlassen wird und andere Verkehrsteilnehmer nicht durch einen zu geringen Sicherheitsabstand gefährdet werden.

In Abb. 5-5 werden äquivalent zu Abb. 5-4 Fahrmanöver anhand ihrer Auffälligkeit und ihres Informationsgehalts bewertet und verglichen.

Im Bereich der Fahrmanöver sind nur begrenzt Varianten denkbar, die zur Kennzeichnung eines Notfalls sowie der Fahrstreifenwechselabsicht geeignet sind. Bereits zuvor wurde gezeigt, dass ein Spurversatz in Richtung der rechten Fahrbahnmarkierung denkbar ist, um die Erkennung der Fahrstreifenwechselabsicht zu unterstützen. Eine Annäherung an die linke Markierung widerspricht der gewünschten Handlungsabsicht, ähnlich wie es bei dem linken Fahrtrichtungsanzeiger der Fall ist. Bremsrucke sind für umliegende Verkehrsteilnehmer voraussichtlich kaum erkennbar und dienen eher zur Warnung des Fahrers im eigenen Fahrzeug. Schlangenlinien im eigenen Fahrstreifen wurden bereits von Schwarz und Decke [122] untersucht. Eine Variation der Amplitude und der Frequenz der gefahrenen Schlangenlinien könnte eine Steigerungsform darstellen. Beide Varianten zeichnen sich durch eine hohe Auffälligkeit aus. Allerdings besteht auch die Gefahr von Fehlinterpretationen, die von dem eigentlichen Notfall ablenken und beispielsweise eine unaufmerksame Fahrweise vermuten lassen.

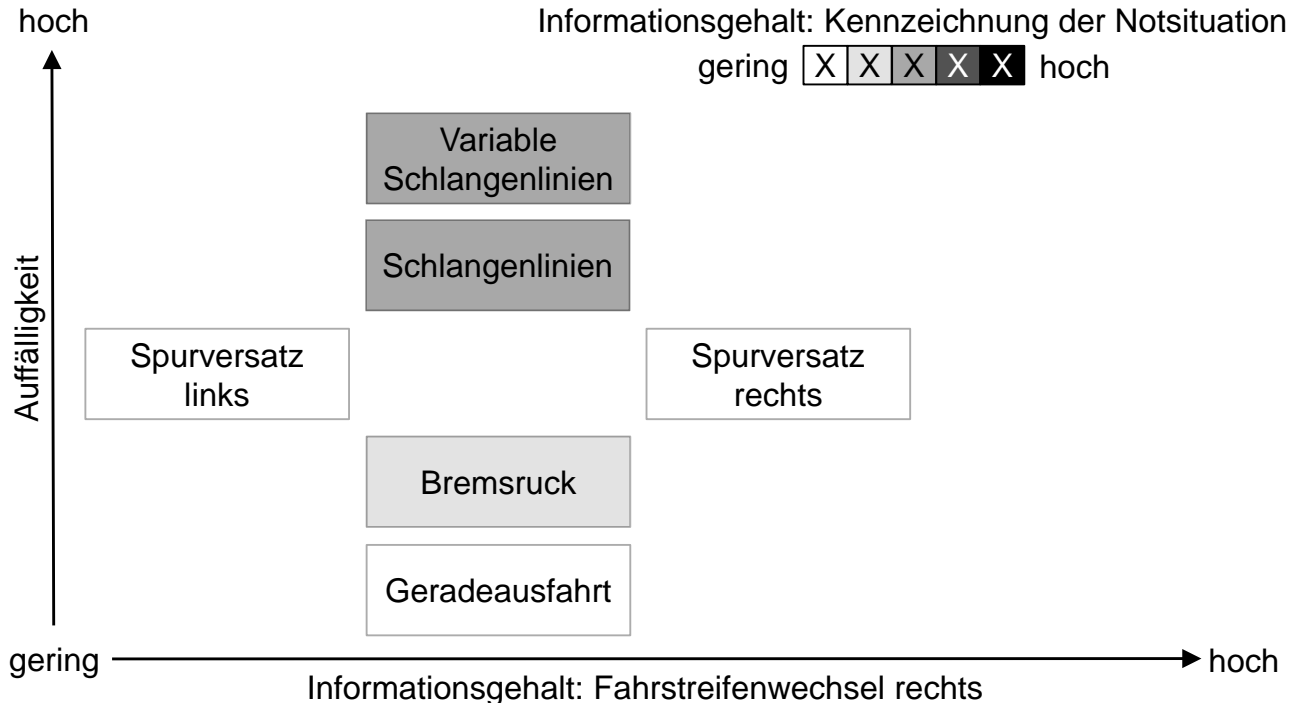


Abbildung 5-5: Bewertung von Fahrmanövern anhand ihrer Auffälligkeit und Verständlichkeit [18]

Kombination

Im Folgenden werden die zuvor analysierten Lichtfunktionen und Fahrmanöver zu insgesamt vier Warnstrategien für die Erprobung im Fahrsimulator kombiniert. Dabei wird beachtet, dass bereits vorhandene Assoziationen mit bekannten Warnelementen nicht widersprochen wird. Da beispielsweise die Ansteuerung der Bremsleuchten bereits zur Signalisierung von Geschwindigkeitsreduktionen verwendet wird, ist eine Verwendung für andere Informationen ausgeschlossen [147]. Allerdings erscheint es durchaus sinnvoll, bestehende Assoziationen gezielt zu kombinieren, um eine Gefahrenwarnung und bevorstehende Handlungsabsichten zu kommunizieren.

In Abb. 5-6 sind die Warnstrategien abgebildet, die während der Probandenstudie untersucht werden.

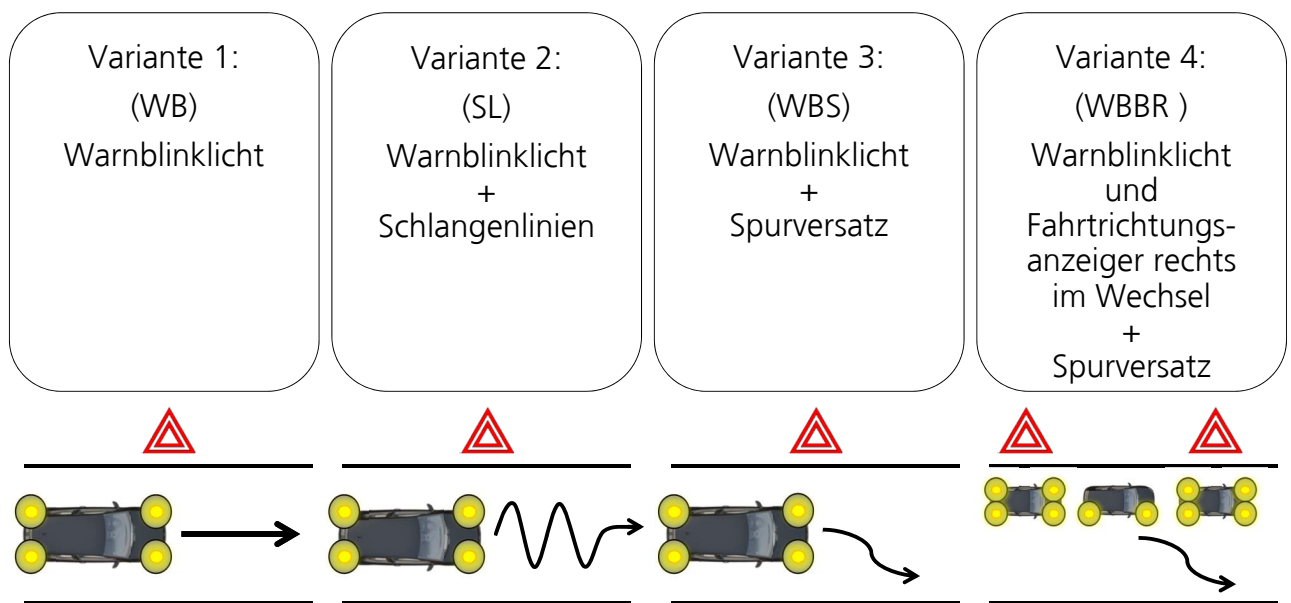


Abbildung 5-6: Im Rahmen der Probandenstudie untersuchte Warnstrategien für ein kooperatives Fahrstreifenwechselmanöver [81]

Variante 1 dient als Referenzmanöver, um das Verhalten der Probanden bei Warnmanövern und in Notfallsituationen im Fahrsimulator zu überprüfen. Vor dem Fahrstreifenwechsel wird hierbei lediglich das Warnblinklicht (WB) aktiviert.

Bei Variante 2 wird das Warnblinklicht mit einem auffälligen Schlangenlinienmanöver (SL) im eigenen Fahrstreifen kombiniert. Die Frequenz beträgt dabei ca. 0,5 Hz und die Amplitude wird so gewählt, dass das Fahrzeug die Fahrstreifenmarkierung nicht berührt. Auf die Verwendung der variablen Schlangenlinien wird verzichtet, da die Durchführungszeit des Manövers voraussichtlich zu lange wäre.

In Variante 3 wird ebenfalls das Warnblinklicht aktiviert. Allerdings wird zusätzlich zur Verdeutlichung der Fahrstreifenwechselabsicht ein Spurversatz (WBS) in Richtung der rechten Fahrstreifenmarkierung durchgeführt.

Bei Variante 4 wird der zuvor beschriebene Spurversatz mit einer erweiterten Lichtfunktion kombiniert. Hierbei werden abwechselnd der rechte Fahrtrichtungsanzeiger und das Warnblinklicht betätigt (zweimal Warnblinklicht, zweimal Fahrtrichtungsanzeiger rechts), um neben der Gefahrenwarnung die Fahrstreifenwechselabsicht zu unterstützen (WBBR).

5.3 Probandenstudie zur Untersuchung von Warnstrategien

Nachdem in Kap. 5.2.2 vier verschiedenen Warnstrategien entwickelt wurden, wird nachfolgend die Probandenstudie beschrieben, in der die verschiedenen Varianten im Fahrsimulator untersucht werden. Zunächst werden einige allgemeine Anforderungen an die Gestaltung der Studie formuliert, bevor im Anschluss daran das Versuchskonzept und die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert werden.

5.3.1 Anforderungen an die Gestaltung der Probandenstudie

Für die Erprobung der Warnvarianten gilt es, ein Szenario auszuwählen, das eine möglichst realistische Umgebung abbildet, aber trotzdem die Möglichkeit zur Auslösung eines NHA bietet. Des Weiteren muss ein Verkehrsszenario gewählt werden, in dem durch kooperatives Verhalten der Probanden ein Fahrstreifenwechsel ermöglicht werden kann, um Rückschlüsse auf das Verhalten der Teilnehmer zu ermöglichen.

Die Studie wird primär aus Sicherheitsgründen im Fahrsimulator und nicht im Realfahrzeug durchgeführt. Außerdem wird neben einer hohen wirtschaftlichen und zeitlichen Effizienz so die Reproduzierbarkeit der Experimente gesteigert, die die Vergleichbarkeit der Probandenreaktionen erleichtert (interne Validität). Nachteilig kann sich hingegen das gesenkte Gefahrenbewusstsein auswirken, das mit Simulatorstudien üblicherweise einhergeht [2].

Zur Sicherstellung der Verallgemeinerungsfähigkeit (externe Validität) werden die Probanden zunächst nicht über die eigentliche Funktion aufgeklärt und durchfahren das Versuchsszenario ohne Vorwissen über das NHA (Erstreaktion). Neben dem Verhalten der Probanden beim kooperativen Fahrstreifenwechsel wird im Rahmen der Studie ebenfalls untersucht, welche Warnstrategien aus Sicht der Probanden favorisiert werden. Aus diesem Grund erfolgt nach der Aufnahme der Erstreaktion eine Aufklärung über das System, nach der die Probanden alle Varianten durchfahren und bewerten sollen (Folgereaktion).

5.3.2 Versuchsszenario

Als Versuchsszenario wird eine zweispurige autobahnähnliche Fernverkehrsstraße inklusive eines Seitenstreifens gewählt (vgl. Abb. 5-7). In der ersten Phase (Phase 0: Folgefahrt) befindet

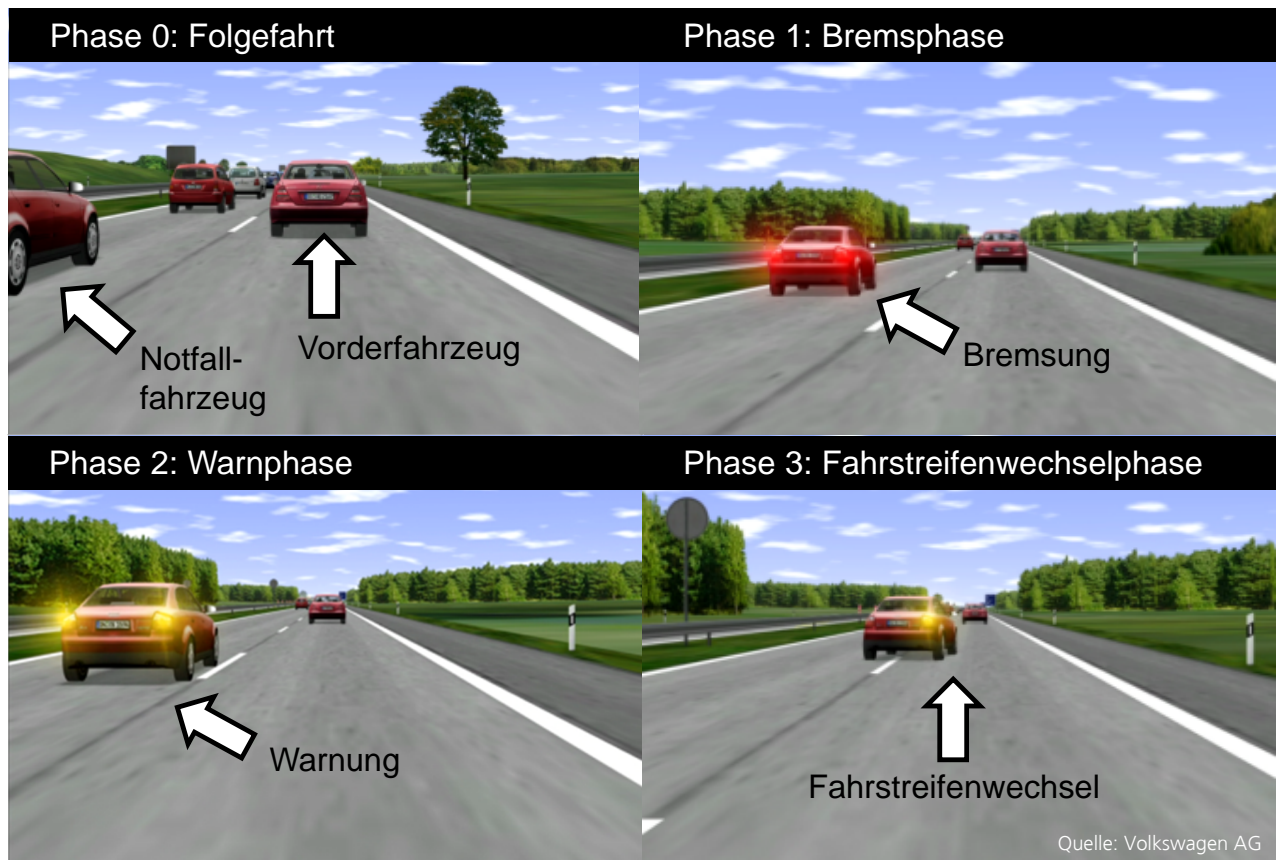


Abbildung 5-7: Versuchsszenario aus Sicht des Probandenfahrzeugs [81]

sich der Proband auf dem rechten Fahrstreifen einer stauähnlichen Situation. Er erhält die Anweisung, dem Vorderfahrzeug mit einem realistischen Abstand zu folgen und außerdem das Rechtsüberholverbot zu beachten. Die im Szenario beschriebene Folgefahrt basiert auf automatisierten Informationsverarbeitungsprozessen, die mehr oder weniger beim Probanden unbewusst ablaufen und nahezu keine kognitiven Ressourcen erfordern. Periphere Wahrnehmungsprozesse sind hierfür ausreichend.

Im zweiten Abschnitt (Phase 1: Bremsphase) wird das Notfallfahrzeug auf dem linken Fahrstreifen vom Versuchsleiter so abgebremst, dass es sich unmittelbar vor dem Probandenfahrzeug befindet und anschließend mit einer vergleichbaren Geschwindigkeit im dichten Verkehr mitfährt. Gleichzeitig wird das Warnblinklicht aktiviert. Die Wahrnehmung von Bremslichtern im vorausfahrenden Verkehr führt zur Aktivierung geprägter Verhaltensmuster (z. B. Verzögerung, Warnblinklicht). Entscheidungsprozesse nehmen nur wenig Zeit in Anspruch (< 1 s). Periphere Wahrnehmungen und kurze Blickzuwendungen sind dafür charakteristisch.

In Phase 2 (Warnphase) wird das Warnmanöver des NHA beim Notfallfahrzeug aktiviert. Die Probanden werden dabei entsprechend einer der vier beschriebenen Warnstrategien gewarnt

und zu einem kooperativen Fahrverhalten motiviert. Diese Situation aktiviert bewusste Informationsverarbeitungsprozesse, die die volle Aufmerksamkeit der Probanden erfordern. Während in den Phasen 0 und 1 überwiegend unbewusste periphere Sehprozesse ausreichen, erfordert Phase 2 eine Aufmerksamkeitszuwendung durch wiederholte Blickzuwendung und zentrale, foveale Informationsverarbeitungsprozess des visuellen Systems [1]. Da in dieser Situation voraussichtlich kein abrufbares automatisiertes Antwortverhalten vorliegt, gilt es, sich ein Bild von der Gefahrensituation zu machen, sich möglicher Gefahren bewusst zu werden und adäquate Handlungsentscheidungen situativ abzuleiten.

In der letzten Phase (Phase 3: Fahrstreifenwechselphase) wird beim Notfallfahrzeug der Fahrtrichtungsanzeiger gesetzt und ein doppelter Fahrstreifenwechsel durchgeführt, bevor es auf dem Seitenstreifen zum Stehen kommt.

Der komplette Ablauf des Versuchsszenarios ist in Abb. 5-8 dargestellt. Die zeitliche Länge der einzelnen Phasen variiert je nach Warnmanöver. Als Richtwerte werden die von Ehmanns geforderte Minstdauern für Warnmanöver bei Fahrstreifenwechseln gewählt [35]. Die Länge der Bremsphase wird durch die Zeit zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit bei geringer Verzögerung ($0,5 - 1 \text{ m/s}^2$) bestimmt. Die exakten Zeiten für die Länge der Warnphase werden mithilfe von Vorversuchen festgelegt. Hierbei gilt es, genügend Zeit zum Wahrnehmen und Verstehen der Warnung einzuplanen, ohne gleichzeitig Irritationen durch zu lange Warnphasen hervorzurufen. Ein Überblick über die Phasenlängen befindet sich in Anhang A.3.

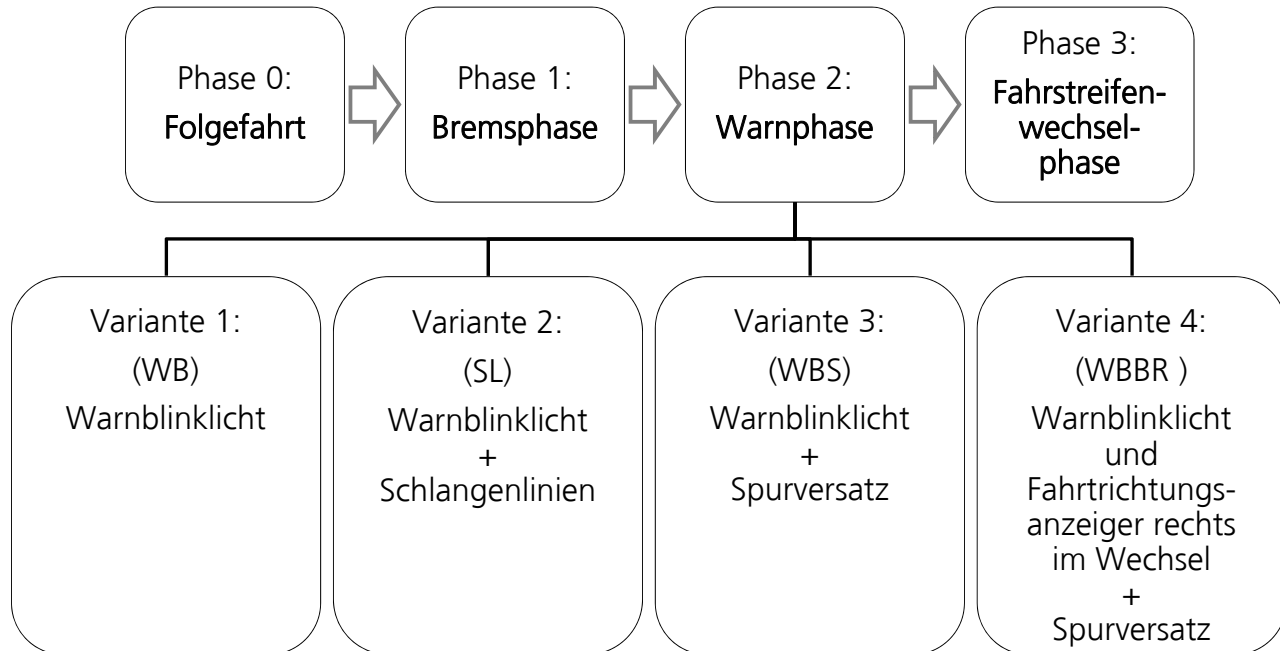


Abbildung 5-8: Ablauf der Phasen im Versuchsszenario [81]

5.3.3 Fahrsimulator und Messtechnik

Die Studie wird im HMI-Simulator der Volkswagen AG Konzernforschung durchgeführt (vgl. Abb. 5-9). Der Aufbau besteht aus einem stationären Simulator mit modularer Sitzkiste. Das vordere Sichtfeld ergibt sich durch eine 3-Kanal-Front-Projektion auf Leinwände, so dass ein Öffnungswinkel von ca. 130° realisiert wird. Die Projektionsflächen in den Rück- und Seitenspiegeln werden in 3 Monitoren hinter der Sitzkiste dargestellt. Die Software zur Programmierung der Fahrszenarien wurde von der Firma Krauss-Maffei-Wegmann entwickelt [90].



Abbildung 5-9: HMI-Simulator der Volkswagen AG Konzernforschung

Für die Bewertung der Warnstrategien wird eine Kombination verschiedener Messmethoden verwendet, bestehend aus Fahrdaten, Blickbewegungsdaten und einer Fragebogenerhebung (Abb. 5-10).



Abbildung 5-10: Messverfahren zur Datenerhebung während der Simulatorstudie

Zur Bewertung des Situationsverständnisses in einer Notfallsituation gilt es, die Aufmerksamkeitsprozesse der Probanden durch geeignete quantitative Messgrößen abzubilden. Aufmerksamkeitszuwendungen lassen sich durch die Häufigkeit und die Dauer von Blickzuwendungen messen [49]. Die Blickdaten werden mithilfe einer am Kopf der Probanden befestigten Brille gemessen.

Um das aus Wahrnehmungs- und Informationsverarbeitungsprozessen resultierende Situationsverständnis zu bewerten, werden Fahrdaten erfasst, die als Reaktion auf eine Situationseinschätzung erfolgen [48]. Bezogen auf das hier beschriebene Notfallszenario werden das Bremsverhal-

ten der Probanden sowie der Abstand zum Vorder- und Notfallfahrzeug erfasst. Die Fahrdaten und Blickbewegungen werden mit den Systemen D-Lab und Dikablis der Firma Ergoneers GmbH aufgezeichnet [89].

Durch die Fragebogenerhebung werden die subjektive Eignung von Warnstrategien anhand von qualitative Aussagen bewertet.

5.3.4 Versuchsplan und Probandenkollektiv

Das Versuchskollektiv setzt sich aus 61 Personen zusammen.⁶ Bei der Auswahl der Probanden werden neben einer PKW-Fahrerlaubnis keine besonderen technischen Vorkenntnisse vorausgesetzt, wobei Personen mit Vorerfahrungen im Fahrsimulator bevorzugt werden. Der Anteil an Probanden mit Vorkenntnissen und Praxiserfahrung im Umgang mit assistierten und teilautomatisierten Fahrerassistenzsystemen beträgt weniger als 20 %. Das Kollektiv ist in 43 % Frauen ($N = 26$) und 57 % Männer ($N = 35$) unterteilt. Die durchschnittliche Fahrleistung beträgt 18.738 km pro Jahr.

Der Versuchsablauf der Studie ist in Abb. 5-11 dargestellt. Nach einer Instruktion zur Versuchstechnik erfolgt eine Eingewöhnungsfahrt im Simulator (A). Das Ziel dabei ist es, den Fahrer insbesondere an das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten des Simulators zu gewöhnen. Hierfür sollen die Probanden einem Vorderfahrzeug, welches ein bestimmtes Geschwindigkeitsprofil abfährt, in einem konstanten Abstand folgen.

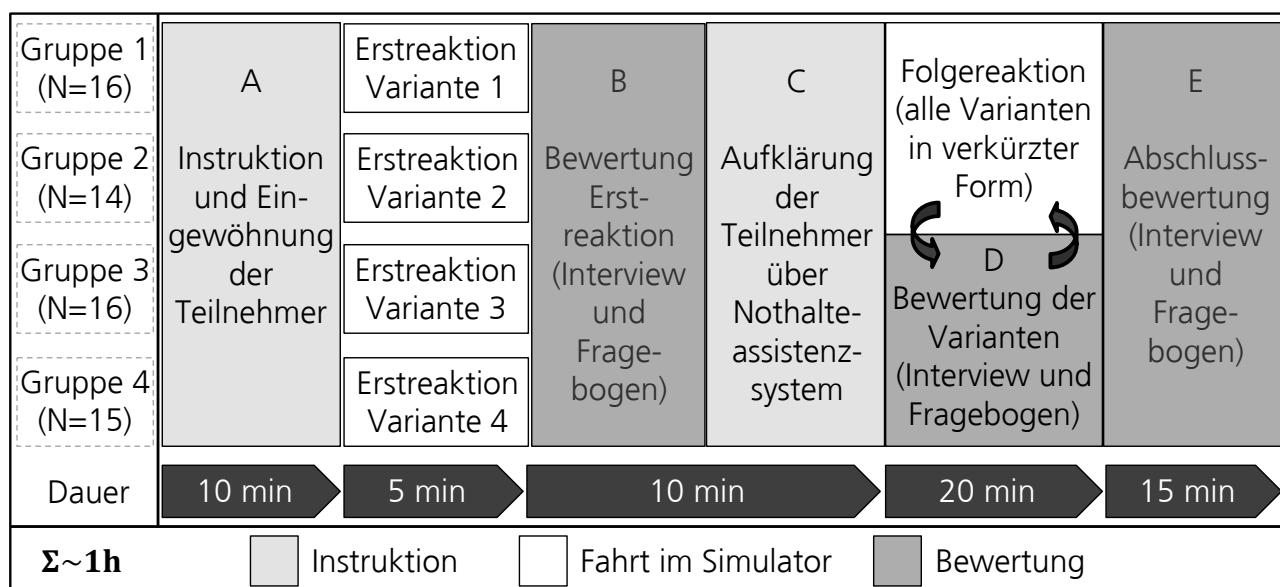


Abbildung 5-11: Ablauf der Probandenstudie [81]

Nach einer Instruktion zur bevorstehenden Aufgabe (Folgefahrt hinter einem Vorderfahrzeug, Rechtsüberholverbot einhalten) durchfahren die Probanden das zuvor beschriebene Szenario.

⁶Die Rekrutierung erfolgt über einen Probanden-Pool der Volkswagen AG, der bereichsübergreifend Mitarbeiter für Simulatorstudien akquiriert.

Dabei absolvieren jeweils 14–16 Probanden eine der vier Varianten. Zur Gewährleistung einer möglichst realistischen Situation erhalten die Versuchspersonen zunächst kein Vorwissen über das NHA bzw. die bevorstehende Notsituation.

Direkt nach Absolvierung der ersten Situation werden die Probanden zu ihrem Verhalten befragt (B). Nach einer Beschreibung der erlebten Situation beantworten die Teilnehmer Fragen zum Grund und der Art ihrer Reaktion in der Notsituation. Die während dieser Zeit aufgezeichneten Blickbewegungs- und Fahrdaten werden später verwendet, um die Angaben zur Reaktion der Teilnehmer zu verifizieren. Im Anschluss daran werden die Probanden über das Nothalteassistentensystem informiert und es wird ihnen die zuvor erlebte Verkehrssituation erläutert (C).

Für den Vergleich der verschiedenen Warnvarianten durchfahren die Teilnehmer im Anschluss daran alle Varianten nacheinander, wobei ein auf die Warnphase (Phase 2) beschränktes Szenario gewählt wird (D). Direkt nach jeder Fahrt werden die Probanden erneut befragt. Während dieser Zeit werden keine Blickbewegungs- und Fahrdaten aufgezeichnet.

In einem abschließenden Interview bewerten die Teilnehmer einzelne Warnelemente und werden zu präferierten Warnstrategien befragt (E).

5.3.5 Ergebnisse und Diskussion

Die Auswertung der Studie soll zeigen, inwiefern eine Erkennung der Notfallsituation (Situationserkennung) durch die untersuchten Warnstrategien erfolgte und ob dem Notfallfahrzeug ein Fahrstreifenwechsel durch kooperatives Verhalten ermöglicht wurde. Grundsätzliches Ziel der Warnmanöver ist es, den nachfolgenden Verkehr zu einer Vergrößerung des Abstandes zum Notfallfahrzeug zu motivieren, ohne zu Irritationen zu führen.

Im ersten Schritt werden zur Bewertung der objektiven Situationserkennung entsprechend des Informationsverarbeitungsprozesses nach Endsley (vgl. Abb. 5-2) die Blickbewegungs- und Fahrdaten während der Erstreaktion, d.h. ohne Vorwissen über das NHA, betrachtet. Anhand der Blickbewegungsdaten wird die Situationswahrnehmung (Perception) während der verschiedenen Warnstrategien analysiert. Inwiefern eine korrekte Situationsinterpretation (Interpretation, Comprehension) im Sinne des kooperativen Fahrstreifenwechsels erzielt wurde, wird aus den Fahrdaten während der Warnphase (Phase 2) und Fahrstreifenwechselphase (Phase 3) abgeleitet. Hierfür werden das Abstands- und Bremsverhalten der Probanden betrachtet.

Im zweiten Schritt werden die objektiven Daten aus der Blickbewegungsanalyse und den Fahrdaten mit subjektiven Daten aus der Fragebogenerhebung verglichen. Eine Bewertung der Gebrauchstauglichkeit von Fahrerassistenzsystemen wurde von Pataki et al. [103] in Anlehnung an DIN EN ISO 9241 durchgeführt [30]. Hieraus ergeben sich Maße, die die Effektivität, das Gefährdungsempfinden und die Zufriedenstellung solcher Systeme bewerten. Für den subjektiven Vergleich der Warnvarianten werden die Fragebogendaten der Erst- und Folgereaktionen ausgewertet (vgl. Abb. 5-11).

Objektive Situationserkennung

Nach Wickens und Horrey lassen sich Aufmerksamkeitszuwendungen anhand der Blickzuwendungsdauer sowie der Blickbewegungsfrequenz treffen [143]. Die Blickzuwendungsdauer entspricht der kumulierten Fixationsdauer der auf das Notfallfahrzeug gerichteten Blicke (Area of Interest), bezogen auf die Gesamtdauer der jeweiligen Phase. Die Blickzuwendungsfrequenz entspricht der durchschnittlichen Frequenz, in der pro Sekunde der Blick auf das Notfallfahrzeug gerichtet wird.

In Abb. 5-12 sind die Blickzuwendungsdauer und -frequenz während der Warnphase für alle vier Warnstrategien aufgetragen. Anhand der kumulierten Blickzuwendungsdauer ist zu erkennen, dass die Variante WB am wenigsten Aufmerksamkeitszuwendung erfährt und damit am wenigsten zur Ankündigung von kooperativen Fahrmanövern geeignet scheint. Eine einfaktorielle Varianzanalyse führt zu dem Ergebnis, dass der Unterschied zwischen den Mittelwerten signifikant ist.⁷ Alle anderen Varianten (WBF, SL und WBBR) zeigen ein ähnliches Niveau an Blickzuwendungen.

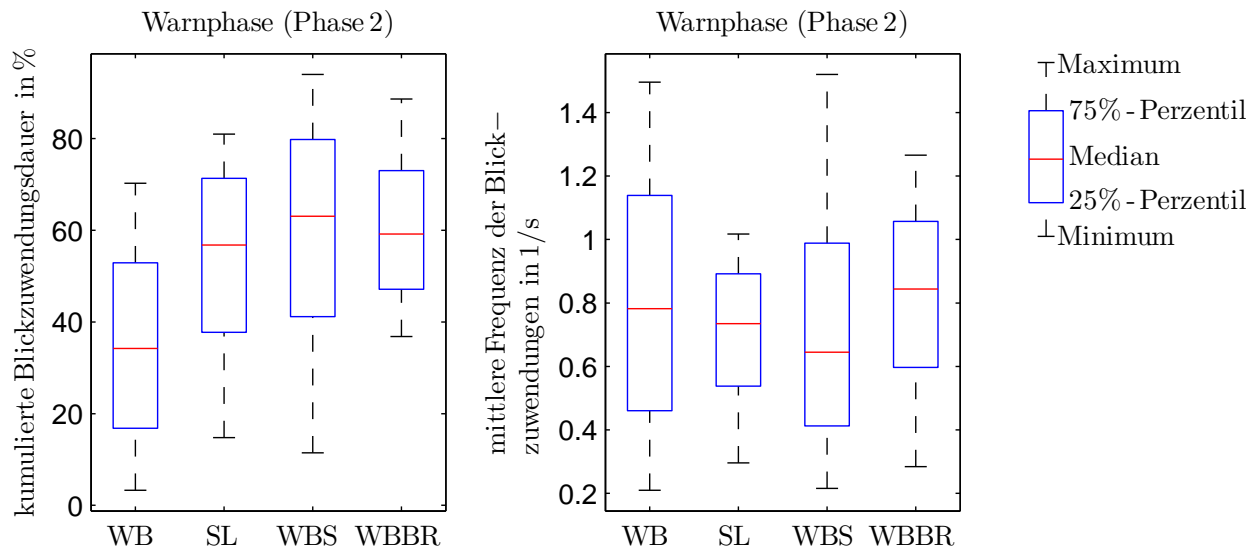


Abbildung 5-12: Blickbewegungsdaten in der Warnphase (links: kumulierte Blickzuwendungsdauer zum Notfallfahrzeug, rechts: Blickzuwendungsfrequenz zum Notfallfahrzeug) (Legende zu Varianten: Warnblinklicht (WB), Warnblinklicht + Schlangenlinien (SL), Warnblinklicht + Spurversatz (WBS), Warnblinklicht und Fahrtrichtungsanzeiger rechts im Wechsel (WBBR))

Bei Betrachtung der Blickzuwendungsfrequenz in der Warnphase werden keine statistisch signifikanten Unterschiede erzielt.⁸ Bei Variante WBBR ist die Frequenz von Blickzuwendungen aber tendenziell höher, was gemäß dem SEEV-Modell (vgl. Kap. 5.2.2) als Indiz für eine erhöhte Aufmerksamkeitszuwendung gewertet werden kann (Abb. 5-12, rechts).

Bei der Betrachtung der Fahrdaten ist erkennbar, dass der mittlere Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug in Variante WBBR am größten ist (vgl. Abb. 5-13, rechts). Der mittlere Abstand

⁷Einfaktorielle Varianzanalyse (engl: analysis of variance ANOVA): $F = 6,239$, $p = 0,001$ [114]. Ab einem Signifikanzniveau $p < 0,05$ wird der Unterschied der Mittelwerte als signifikant angenommen.

⁸ANOVA: $F = 1,114$, $p = 0,352$.

zum Notfallfahrzeug ist in Variante SL am größten (links). Die Unterschiede sind zwar nicht signifikant (ANOVA), zeigen aber auch hier, dass die Variante WB zur Ankündigung eines kooperativen Fahrstreifenwechsels eher ungeeignet ist. Die Varianten WBBR und SL erfahren also ein ähnliches Maß an Aufmerksamkeitszuwendung und sind hinsichtlich der Erzielung des gewünschten Ergebnisses (Abstandsverhalten) vergleichbar gut.

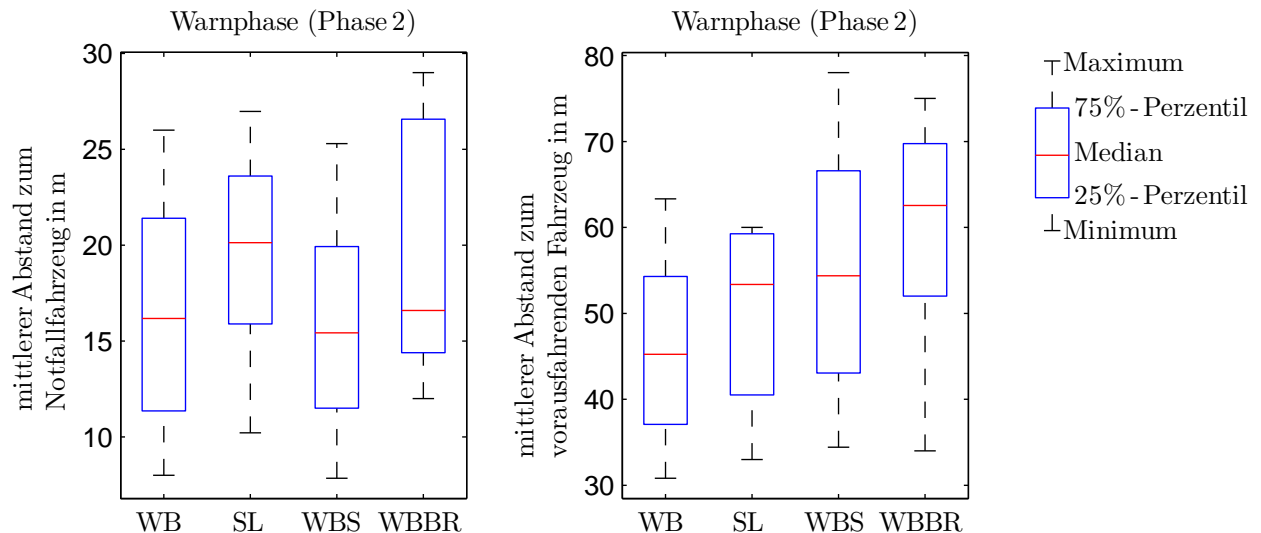


Abbildung 5-13: Abstandsverhalten des Probandenfahrzeugs zum Notfallfahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug während der Warnphase (Legende zu Varianten: Warnblinklicht (WB), Warnblinklicht + Schlangenlinien (SL), Warnblinklicht + Spurversatz (WBS), Warnblinklicht und Fahrtrichtungsanzeiger rechts im Wechsel (WBBR))

Bei der Betrachtung des Bremsverhaltens (vgl. Abb. 5-14) der Probanden während der Warnphase (Phase 2) und der Fahrstreifenwechselphase (Phase 3) ist erkennbar, dass bei den Varianten WB und WBS besonders stark gebremst wird (Betrachtung der Maxima und Perzentile der Bremspedalstellung) und die Bremsreaktionen interindividuell sehr unterschiedlich ausfallen (Varianz). Auch hier sind die Unterschiede zwischen den Warnvarianten nicht signifikant (ANOVA), allerdings erscheint das Bremsverhalten in Variante WBBR vorteilhaft, da keine starken Bremsmanöver vorkommen, die sich negativ auf die Verkehrssicherheit nachfolgender Fahrzeuge auswirken könnten. In den Varianten WB und WBS wird der Fahrstreifenwechsel offenbar oft zu spät bemerkt, was zu relativ starken Bremsreaktionen führt.

Zusammenfassend führen also mehrere Varianten (WBBR, WBF und SL) zu Aufmerksamkeitszuwendungen, die für eine Situationserkennung grundlegend sind. Dass eine handlungsrelevante Situation erkannt wurde, zeigen das Abstandsverhalten zum Vorder- und Notfallfahrzeug und das Bremsverhalten der Fahrer. Die Häufigkeit der Blickzuwendungen und das Fehlen starker Bremsmanöver in der Warnvariante WBBR deuten auf ein anderes Situationsverständnis gegenüber den Varianten WBF und SL hin. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass bei der Variante WBBR eine kontinuierliche Auseinandersetzung (conscious dynamic reflection, nach Bedny und Meister [12]) mit der Situation stattfindet. Die Situation scheint einen kontrollierten Ablauf ohne Überraschungen zu haben.

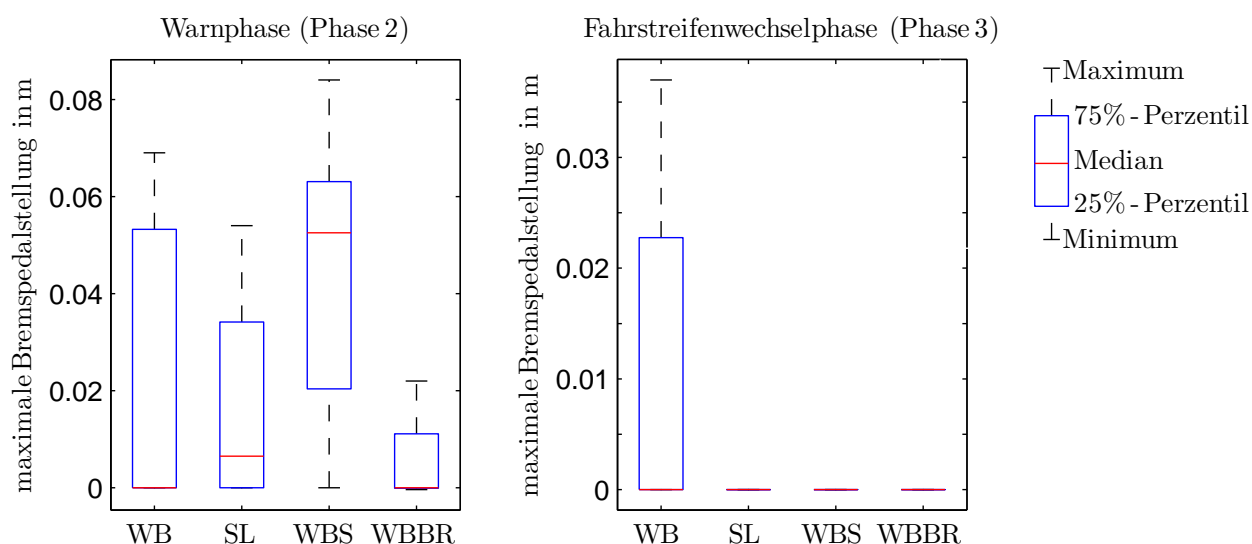


Abbildung 5-14: Maximale Bremspedalstellung im Probandenfahrzeug während der Warn- und Fahrstreifenwechselphase [81] (Legende zu Varianten: Warnblinklicht (WB), Warnblinklicht + Schlangenlinien (SL), Warnblinklicht + Spurversatz (WBS), Warnblinklicht und Fahrtrichtungsanzeiger rechts im Wechsel (WBBR))

Subjektive Situationsbewertung

Im Anschluss an die Analyse der Blickbewegungs- und Fahrdaten und den daraus abgeleiteten Thesen zur Bewertung der einzelnen Warnvarianten erfolgt die Auswertung der Fragebögen. Ziel dabei ist es, durch subjektive Aussagen mögliche Gründe für das beobachtete Verhalten der Teilnehmer zu erhalten.

Um das bewusste Erleben der Situation und die Effektivität der Manöver zu bewerten, werden die Versuchspersonen nach der Erstreaktion zunächst befragt, ob die erlebte Situation einen Einfluss auf ihr Fahrverhalten hatte. Über 90 % der 61 Versuchspersonen bejahen diese Frage, was die Folgerung zulässt, dass durch die Warnvarianten die Aufmerksamkeit der Probanden erregt wurde.

Zur Bewertung des Situationsverständnisses und der Auftretenswahrscheinlichkeit von kooperativem Verhalten werden die Teilnehmer nach der Art ihrer Reaktion befragt (vgl. Abb. 5-15). Bei der Warnvariante SL wird am häufigsten eine kooperative Intention als Begründung für das Fahrverhalten der Probanden genannt. Allerdings wird ebenfalls ersichtlich, dass in 19 % der Fälle der Abstand zum Notfallfahrzeug aufgrund einer erhöhten Gefahrenempfindung vergrößert wurde. Somit wird zunächst eine hohe Effektivität im Sinne einer Abstandvergrößerung erzielt, jedoch ist die Variante aufgrund der Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer für den realen Straßenverkehr ungeeignet. Ein vergleichbares Ergebnis wird von der Variante WBBR erzielt, allerdings ohne eine latente Gefahrenempfindung. Hierbei ist das Verhalten ebenfalls in über 50 % kooperativ motiviert. In über 25 % der Fälle wurde der Abstand aufgrund der erkannten Fahrstreifenwechselintention in der Fahrstreifenwechselphase vergrößert. Bei den Varianten WB und WBS hingegen wurde in ca. 50 % der Fälle ein plötzliches Abbremsen als Reaktion genannt, um eine Kollision mit dem einscherenden Notfallfahrzeug zu vermeiden. In

einigen Fällen (WB, WBS, WBBR) hätten sich die Studienteilnehmer im realen Verkehr nicht an das Rechtsüberholverbot gehalten und das Notfallfahrzeug rechts passiert.

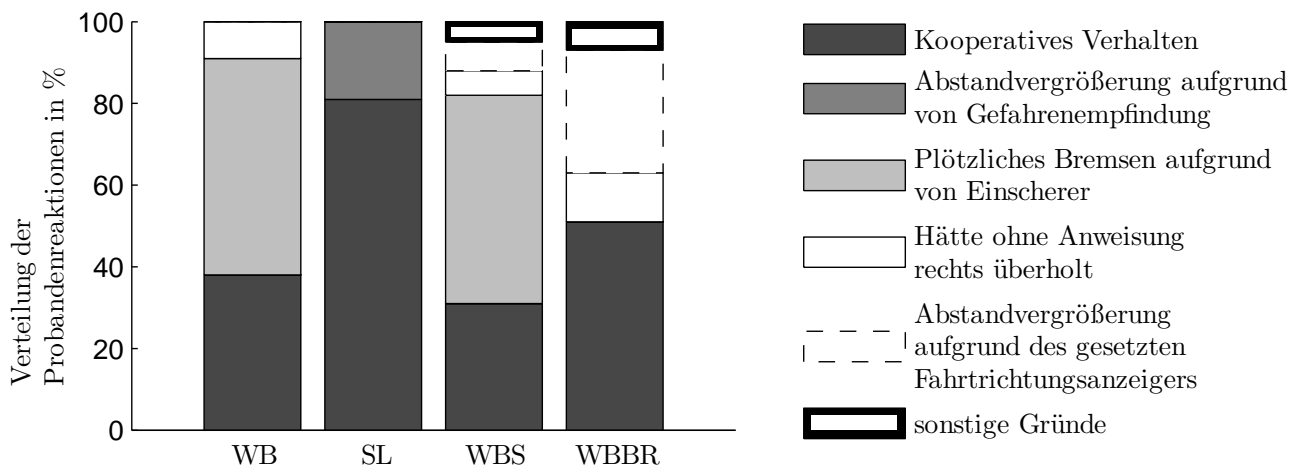


Abbildung 5-15: Begründungen für das Fahrverhalten der Probanden während der Notsituation (nach der Erstreaktion) [81]

Im Anschluss daran werden die Versuchsteilnehmer nach ihrer Gefahrenempfindung in der jeweiligen Situation befragt (vgl. Abb. 5-16). Es bestätigt sich die zuvor festgestellte erhöhte Gefahr bei der Warnvariante SL. Allerdings ergibt sich auch bei den Varianten WB und WBS eine mittel stark empfundene Gefahr, während sie bei der Variante WBBR am geringsten ist. Hier zeigt die durchgeführte Varianzanalyse signifikante Unterschiede.⁹

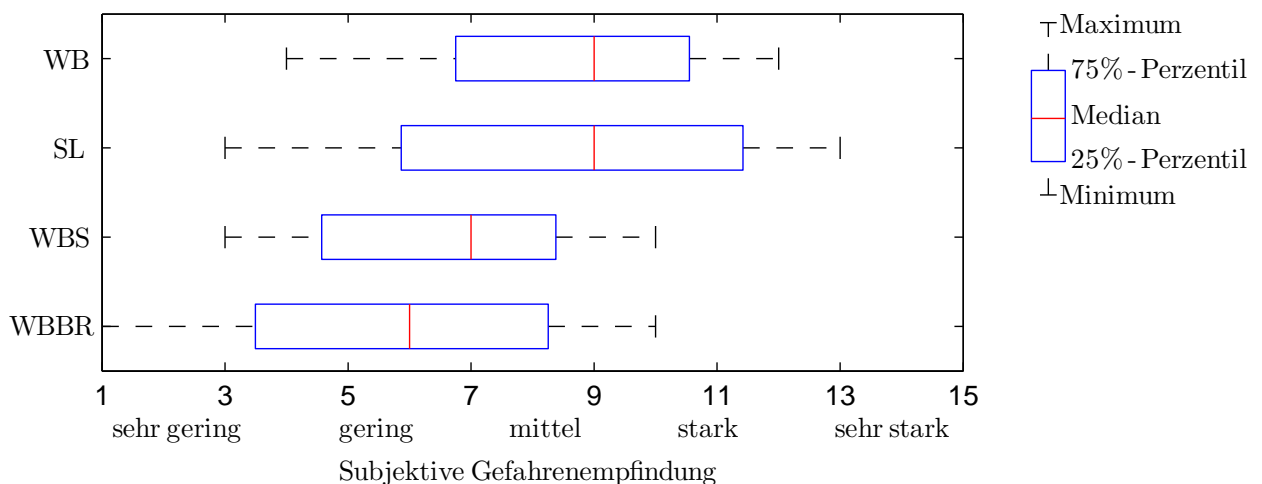


Abbildung 5-16: Subjektiv empfundene Gefährdung während der Erstreaktion [81] (Legende zu Varianten: Warnblinklicht (WB), Warnblinklicht + Schlangenlinien (SL), Warnblinklicht + Spurversatz (WBS), Warnblinklicht und Fahrtrichtungsanzeiger rechts im Wechsel (WBBR))

Nachdem die Probanden alle Varianten nacheinander absolviert haben (Folgereaktion), werden sie gefragt, welche der erlebten Warnelemente sie für die Durchführung eines Nothaltemanövers bevorzugen (vgl. Abb. 5-17).

⁹ANOVA: $F = 4,302, p = 0,008$.

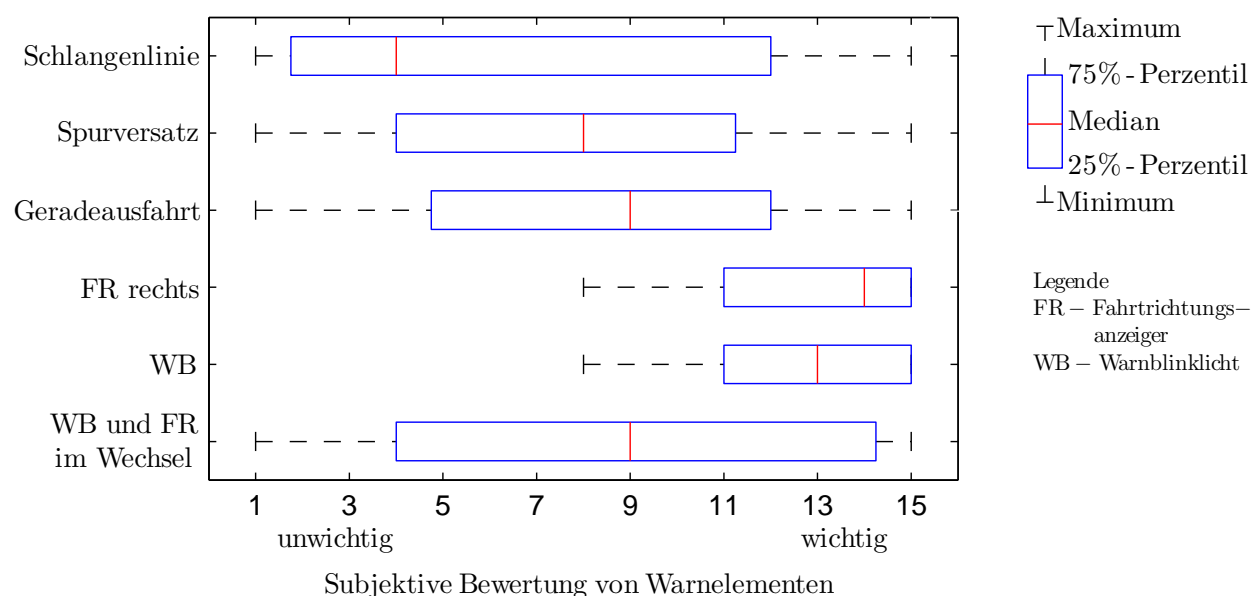


Abbildung 5-17: Subjektive Bewertung einzelner Warnelemente für die Durchführung eines kooperativen Nothaltemanövers [81]

Es zeigt sich, dass das Warnblinklicht und der Fahrtrichtungsanzeiger zur Ankündigung des Fahrstreifenwechsels präferiert werden, was tendenziell mit den objektiven Ergebnissen der Erstreaktion übereinstimmt.

Vergleich der Varianten

Im abschließenden Vergleich der Varianten stellt sich heraus, dass das Warnblinklicht zwar ein eindeutiges Mittel zur Kennzeichnung einer Notsituation ist, es allerdings nicht ausreicht, um eine Fahrstreifenwechselintention zu vermitteln (Variante WB). Dies zeigt sich insbesondere an den späten Reaktionen der Versuchsteilnehmer, was vereinzelt zu starken Verzögerungen führt, sobald das Notfallfahrzeug den Fahrstreifenwechsel durchführt.

Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich bei dem um einen Spurversatz ergänzten Manöver (WBS). Das Fahren am rechten Fahrbahnrand wird zum Teil von einigen Versuchspersonen gar nicht wahrgenommen und resultiert ebenfalls in starken Verzögerungen, sobald das Notfallfahrzeug den eigenen Fahrstreifen verlässt. Einige Teilnehmer nehmen das Manöver als zögerlichen Fahrstreifenwechsel war, der zunächst nicht vollständig durchgeführt wird und deshalb für Irritation sorgt.

Die Variante WBRR sorgt bei einigen Teilnehmern aufgrund des verhalten durchgeführten Fahrstreifenwechsels ebenfalls für Irritationen, allerdings kommt es hierbei nicht zu plötzlichen Reaktionen der Probanden. Dies liegt vor allem daran, dass der Fahrstreifenwechsel in Kombination mit der Notsituation im Vorfeld angedeutet und so die Aufmerksamkeit der Probanden geweckt wird. Möglicherweise kann durch eine Verkürzung der Warnphase eine zusätzliche Verbesserung des Situationsverständnisses erzielt werden. Die gilt es im Rahmen einer Folgestudie mit einer unabhängigen Probandenstichprobe zu untersuchen.

Bei der Variante mit den Schlangenlinien (SL) wird ebenfalls eine hohe Aufmerksamkeitszuwendung (vgl. Abb. 5-12) erzielt, was zu einem erhöhten Abstand zum Notfallfahrzeug und geringeren Verzögerungen während des Fahrstreifenwechsels führt. Allerdings wird, wie in der Studie von Schwarz und Decke [122], das Manöver von einigen Versuchsteilnehmern als beängstigend empfunden. Dies führt dazu, dass die Probanden den Fahrzeugabstand nicht nur aus einer kooperativen Motivation heraus vergrößern, sondern auch durch Gefahrenempfindung.

Abschließend wird festgestellt, dass für die Durchführung eines kooperativen Fahrstreifenwechselmanövers die Warnvariante WBBR am geeignetsten erscheint. Durch den Wechsel des Fahrtrichtungsanzeigers und des Warnblinklichts wird WBBR als frühzeitige, eindeutige und dabei nicht wie SL als gefährliche Warnung eingeschätzt. Im Vergleich zu den Varianten WB und WBS bleiben bei WBBR plötzliche Reaktionen der Versuchsteilnehmer aus. Allerdings wird über alle Varianten hinweg in den wenigsten Situationen die eigentliche Ursache für das Manöver des Notfallfahrzeugs erkannt. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Studie von Schwarz und Decke [122], bei der selbst unter Zuhilfenahme eines zusätzlichen Displays mit Warnhinweisen die Notfallursache nicht vermittelt werden konnte. Dennoch tritt in den meisten Fällen die gewünschte Reaktion, nämlich die Vergrößerung des Abstandes zum Notfallfahrzeug, ein, so dass eine Erkennung des medizinischen Notfalls nicht zwingend erforderlich erscheint.

5.4 Zusammenfassung

In Kap. 5 wurden gemäß den Anforderungen in Tab. 2-4 Warnstrategien für ein Nothalteassistentensystem untersucht, die auf serienmäßigen Warnelementen basieren und nachfolgende Verkehrsteilnehmer zu kooperativem Verhalten motivieren sollen.

Nach der Erläuterung der Zweckmäßigkeit eines kooperativen Fahrstreifenwechselmanövers wurden die Grundlagen des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses vorgestellt. Es stellte sich als vorteilhaft heraus, in anspruchsvollen Verkehrssituationen bekannte Warnelemente (Warnblinklicht, Fahrtrichtungsanzeiger) zu verwenden, da die Gedächtnismuster zur Überwachung dieser Warnelemente bereits aktiviert sind und eine Interpretation von neuen Warnelementen durch begrenzte kognitive Ressourcen erschwert ist.

Im Anschluss daran wurden vier Warnstrategien entwickelt, die sich mit serienmäßigen Gestaltungselementen realisieren lassen, um sie anschließend im Rahmen einer Probandenstudie im Fahrsimulator zu untersuchen. Hierfür wurden Lichtfunktionen und Fahrmanöver betrachtet, die Aufmerksamkeitszuwendungen erhöhen können. Als Referenzmanöver wurde die reine Ansteuerung des Warnblinklichts verwendet (WB). In der zweiten Variante wurden vom Notfallfahrzeug Schlangenlinien bei gleichzeitig eingeschaltetem Warnblinklicht durchgeführt (SL). Die Literaturrecherche hat ergeben, dass ein Spurversatz in Richtung der Fahrstreifenmarkierung die Fahrstreifenwechselintention unterstützen kann. Dies wurde bei der dritten Variante (WBS)

umgesetzt. Als vierte Variante wurde eine Kombination aus Spurversatz und erweiterter Lichtfunktion untersucht, bei der abwechselnd das Warnblinklicht und der Fahrtrichtungsanzeiger angesteuert werden (WBBR).

In einem autobahnähnlichen Szenario wurden alle vier Varianten in einer Probandenstudie mit 61 Teilnehmern untersucht. Es stellte sich heraus, dass die Probanden bei den Varianten WB und WBS den Fahrstreifenwechsel nicht erkannt haben, was zu starken Bremsreaktionen führte. Bei der Variante mit den Schlangenlinien erfolgte größtenteils eine Vergrößerung des Abstandes, allerdings wurde die Situation häufig als gefährlich eingeschätzt. Die besten Ergebnisse wurden mit der Variante WBBR erzielt, da sowohl die Notsituation als auch die Fahrstreifenwechselintention erkannt wurden.

Ausblickend ist zu sagen, dass die Untersuchung von weiteren Warnstrategien als sinnvoll erachtet wird. Diese Arbeit beschränkte sich auf die Verwendung von Technologien, die bei serienmäßigen Fahrzeugen mit wenig Applikationsaufwand durchführbar sind.

In zukünftigen Fahrzeugen werden Rückleuchten zunehmend durch LED-Systeme realisiert. Diese bieten die Möglichkeit, durch die einzelne Ansteuerung der LEDs komplexere Warnvarianten umzusetzen. So ist es beispielsweise denkbar, bei der Variante WBBR die Lichtfunktion durch ein von links nach rechts wanderndes Warnblinklicht zu unterstützen, so dass gleichzeitig gewarnt und der Fahrstreifenwechsel angedeutet wird. Dies wird möglicherweise zu einer Verkürzung des Warnmanövers führen. Ebenfalls denkbar ist es, die Frequenz des Warnblinklichts zu verändern, um eine weitere Warninformation zu gestalten. Allerdings ist hierbei darauf zu achten, dass nicht der Eindruck einer defekten Rückleuchte entsteht.

Unumgänglich ist die Untersuchung der Warnstrategien im Realfahrzeug, da sich insbesondere die Gefahrenempfindung im echten Fahrzeug von der Situation im Fahrsimulator unterscheidet. Eine Erprobung in Szenarien außerhalb der Autobahn erscheint ebenfalls als sinnvoll, da z. B. im Stadtverkehr und auf Landstraßen die Warnvarianten einen anderen Effekt erzielen können. Insbesondere durch geringere Geschwindigkeiten und andere Verhaltensmuster bei Fahrstreifenwechseln sind andere Ergebnisse zu erwarten. So wird möglicherweise ein Spurversatz eher wahrgenommen, da die Fahrstreifenbreite geringer ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Die **Motivation** der vorliegenden Arbeit ist darin begründet, einen Beitrag zur Vermeidung von Verkehrsunfällen zu leisten, die sich aufgrund von medizinischen Notfällen der Fahrzeugführer ereignen. Unfallstatistiken zufolge sind min. 4 % der Verkehrsunfälle auf diese Ursache zurückzuführen. Durch den demografischen Wandel der Gesellschaft werden derartige Fälle in der Zukunft einen zunehmenden Anteil am Gesamtunfallgeschehen haben. Nothalteassistenzsysteme verfolgen das Ziel, eine durch medizinische Notfälle verursachte Fahruntfähigkeit der Fahrzeugführer zu detektieren und das Fahrzeug durch ein automatisches Fahrmanöver kontrolliert in den Stillstand zu überführen. Forschungsarbeiten beschäftigen sich bereits mit der Messung von Vitaldaten im Fahrzeug sowie mit der Umsetzung von automatischen Fahrfunktionen. Juristische Betrachtungen haben ergeben, dass die Einführung von NHA im Gegensatz zu anderen hochautomatischen Fahrfunktionen bei einer risikominimierenden Auslegung realisierbar ist.

Zum gegenwärtigen **Stand der Wissenschaft** war **nicht bekannt**, welche Anforderungen sich an die Funktionsgestaltung von NHA unter Beachtung der rechtlichen Vorgaben ableiten lassen und wie sie in einer Fahrfunktion umsetzbar sind. Weiterhin ist bislang nicht hinreichend geklärt, welche medizinischen Notfälle sich im Fahrzeug voraussichtlich ereignen und mit welchen Sensoren sie detektiert werden können, ohne den Fahrer zu beeinträchtigen oder ihn von seiner Fahraufgabe abzulenken.

Ziel dieser Arbeit war es, erstmals eine Systematik zur Gestaltung von NHA zu entwickeln und einen Beitrag zur Erkennung von medizinischen Notfällen sowie zur Umsetzung einer Gesamtfunktionsarchitektur anhand der rechtlichen Anforderungen zu leisten.

Zunächst wurden anhand einer rechtlichen Betrachtung sowie anhand von Normen und Verordnungen zu Fahrerassistenzsystemen **Anforderungen** für die Entwicklung von NHA abgeleitet. Die wesentliche Erkenntnis ist, dass für eine risikominimale Auslegung des NHA die vom System ausgehende Betriebsgefahr zu senken ist, sobald es aktiviert wurde. Hierfür ist es notwendig, eindeutige Systemgrenzen zu definieren, die zwar nicht alle denkbaren Verkehrssituationen abdecken müssen, deren beinhaltete Funktionsumfänge allerdings nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu entwickeln sind und vom Fahrer im Fall einer Fehlaktivierung beherrscht werden müssen. Diesbezüglich wurden Anforderungen an die Funktionsauslegung, die

Umfeldsensorik, das HMI, die Fahrerzustandssensorik sowie an die Warnelemente für umliegende Verkehrsteilnehmer abgeleitet und durch mögliche Fragestellungen ergänzt.

Darauf basierend wurde im Anschluss die Umsetzung dieser Anforderungen in einer **Systemarchitektur** betrachtet. Entsprechend der zentralen Forderung nach einer Senkung der Betriebsgefahr wurden Maßnahmen definiert, die sich primär durch eine Geschwindigkeitsreduktion sowie das Anfahren des Seitenstreifens auszeichnen. Allerdings erscheint es ebenfalls zielführend, den Verlauf der Fahrbahn bei der Wahl einer geeigneten Halteposition einzubeziehen und andere Verkehrsteilnehmer entsprechend einer Warnstrategie zu warnen. Im Anschluss daran wurde betrachtet, welche verschiedenen Funktionsumfänge zur Einführung von NHA denkbar sind und welche Anforderungen sich dadurch an die Sensoren zur Umfeldwahrnehmung ableiten lassen. Als seriennahe Minimallösung ist ein kontrolliertes Anhalten im eigenen Fahrstreifen mithilfe einer Frontkamera und eines Frontradars möglich. Die Maximallösung umfasst zusätzlich vier Nahbereichsradare, die den seitlichen und hinteren Bereich des Fahrzeugs abdecken und die Durchführung von mehreren Fahrstreifenwechseln unter Berücksichtigung der umliegenden Verkehrsteilnehmer ermöglichen. Hierfür wurden des Weiteren Ansätze zur Zustandsregelung, Bahnplanung und zur Fahrerinformation (HMI) aufgezeigt.

Für die **Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug** wurden relevante Notfälle untersucht und Möglichkeiten zu deren automatisierter Detektion im Fahrzeug aufgezeigt. Hierfür wurden anhand von verschiedenen Studien kardiovaskuläre Notfälle als Hauptursache für das Eintreten einer medizinisch bedingten Fahrunfähigkeit identifiziert. Eine automatisierte Erkennung dieser Notfälle im Fahrzeug wird zukünftig voraussichtlich durch die Messung der Herzratenvariabilität möglich sein. Die Grundlage dafür bietet die Messung der mittleren Herzrate. Aus diesem Grund wurden Sensoren zur Messung der Herzrate im Fahrzeug diskutiert, mit dem Ergebnis, dass kapazitive und kamerabasierte Verfahren am vielversprechendsten erscheinen. Diese beiden Verfahren wurden im Rahmen einer Probandenstudie in einem Laboraufbau mit 27 Probanden auf den Einfluss von Störgrößen untersucht und anhand der mittleren Herzrate verglichen. Als Störgrößen wurden Licht- und Bewegungseinflüsse ausgewählt, da sie den größten Einfluss auf die Messverfahren haben. Als Referenz wurde ein geklebtes EKG mit 3 Elektroden verwendet. Es wurde festgestellt, dass das kamerabasierte Verfahren bei Impulsanregungen des Messstands durch Stöße bessere Ergebnisse als das kapazitive EKG liefert, da geringe Bewegungen des Kopfes durch das Tracking kompensiert werden, während auch geringe Bewegungen die Qualität aller kapazitiven Elektroden negativ beeinflussen. Im Gegensatz dazu haben stärkere Drehungen des Kopfes, wie z. B. bei einem Schulterblick, das kapazitive Verfahren weniger stark beeinflusst. Der Grund dafür ist eine geringe Beeinflussung der niedrigen Elektroden des kapazitiven EKG durch Kopfbewegungen, während andererseits das kamerabasierte Verfahren im Extremfall keine Messdaten ausgeben konnte, weil das Gesichtsfeld des Probanden aus dem Sichtbereich der Kamera verschwand. Diese teilweise gegensätzlichen Ergebnisse haben Potentiale für eine Sensordatenfusion offengelegt. Verbesserungspotentiale für nachfolgende Studien sind u.a. bei der Wahl der Referenzelektrode des kapazitiven EKG denkbar. Es gilt zu untersuchen, ob die Elektroden im Lendenbereich oder auf der Sitzfläche geringer durch

Bewegungseinflüsse beeinflusst werden als die zuvor gewählte Referenzelektrode im mittleren Bereich der Rückenlehne. Im besten Fall würde dies zu einer Qualitätssteigerung aller Ableitungen führen und sich somit ebenfalls positiv auf die Mehrkanaldetektion auswirken.

Nach der Aktivierung eines NHA auf einer Fahrbahn mit mehreren Fahrstreifen ist es sinnvoll, umliegende Verkehrsteilnehmer über den Systemzustand zu informieren. Insbesondere im dichten Verkehr ist eine kooperative Abstandsvergrößerung zum Notfallfahrzeug wünschenswert, da die Durchführung von automatischen Fahrmanövern, wie z. B. von Fahrstreifenwechseln, in der Regel größere Freiräume im Vergleich zur manuellen Variante notwendig macht. Aus diesem Grund wurden im Rahmen einer Probandenstudie (61 Teilnehmer) in einem stationären Fahrsimulator vier **Warnstrategien** untersucht, anhand derer betrachtet wurde, ob Fahrern der medizinische Notfall vermittelt werden kann und ob sie **für ein kooperatives Verhalten** in Form einer Abstandsvergrößerung motiviert werden können. Die insgesamt vier Warnstrategien setzten sich aus seriennahen Lichtfunktionen (Warnblinklicht, Fahrtrichtungsanzeiger) und Fahrmanövern (Schlangenlinie, Spurversatz) zusammen. Für die Bewertung der Varianten wurden Blickbewegungs- und Fahrdaten aufgezeichnet und mit subjektiven Bewertungen aus einer Fragenbogenerhebung verglichen. Die besten Ergebnisse wurden mit einer Variante erzielt, bei der abwechselnd das Warnblinklicht und der Fahrtrichtungsanzeiger aktiviert werden und das Fahrzeug einen Spurversatz in Richtung der rechten Fahrbahnmarkierung durchführt, bevor der Fahrstreifenwechsel eingeleitet wird (Variante WBBR). Für diese Variante konnte bei den Probanden die größte Aufmerksamkeitszuwendung und eine kontrollierte Abstandsvergrößerung zum Notfallfahrzeug festgestellt werden, was auf ein korrektes Situationsverständnis und eine gute Situationsbewältigung hindeutet. Zusätzlich wurden die Messwerte der Blickbewegungs- und Fahrdaten durch die subjektiven Aussagen der Befragung bestätigt. Verbesserungspotentiale ergeben sich bei den Zeitdauern der einzelnen Phasen des Warnmanövers, da einige Probanden die Warndauer für zu lang empfunden haben und es somit zu Irritationen bei der eigentlichen Intention des Notfallfahrzeugs gekommen ist. Anhand einer unabhängigen Probandenstichprobe gilt es zu untersuchen, ob eine Variation der zeitlichen Abfolge des Warnmanövers eine eindeutigere Handlungsabsicht des Notfallfahrzeugs vermitteln kann.

Basierend auf den Forschungsergebnissen dieser Arbeit lassen sich folgende Gestaltungsmaßnahmen für eine praktische Umsetzung eines NHA festhalten:

- Für eine risikominimale Auslegung von Nothalteassistenzsystemen gilt es, die Fahrzeuggeschwindigkeit unter Beachtung des Fahrbahnverlaufs zu reduzieren und nach Möglichkeit auf dem Seitenstreifen zum Stillstand zu kommen.
- Eine Realisierung dieser Systeme ist voraussichtlich mit seriennaher Umfeldsensorik (Fernbereichsradar im Frontbereich, Nahbereichsradare im Seiten- und Heckbereich, Frontkamera, Ultraschallsensoren) möglich.
- Kamerabasierte und kapazitive Verfahren eignen sich grundsätzlich zur Messung der mittleren Herzrate im Fahrzeug. Weitere Nachforschungen sind hinsichtlich der Sensorrobust-

heit bei Störeinflüssen wie Licht- und Bewegungsartefakten sowie bei unterschiedlichen Kleidungsmaterialien notwendig. Zur automatisierten Erkennung von kardiovaskulären Notfällen bietet die Analyse der Herzratenvariabilität Anknüpfungspunkte für Folgearbeiten.

- Hinter dem Notfallfahrzeug fahrende Verkehrsteilnehmer können mithilfe von Lichtfunktionen (Abwechselnde Ansteuerung des Warnblinklichts und des Fahrtrichtungsanzeigers rechts) und eines Spurversatzes in Richtung der rechten Fahrbahnmarkierung zu einem kooperativen Verhalten in Form einer Abstandsvergrößerung motiviert werden.

Ausblick

Anschlusspunkte für Folgearbeiten ergeben sich insbesondere hinsichtlich folgender Aspekte:

- Quantifizierung des Betriebsrisikos von automatischen Fahrmanövern
- Automatisierten Erkennung von kardiovaskulären Notfällen im Fahrzeug

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, welche Systemgrenzen sich für die Gestaltung eines NHA bei der Verwendung von seriennaher Technik ergeben. Für eine Erweiterung dieser Grenzen ist ein Maß zur Bestimmung der Betriebsgefahr eines automatisch fahrenden Fahrzeugs notwendig. Mithilfe dieses Maßes ließe sich z. B. die Fragestellung beantworten, wie lange das Fahrzeug zur Auffindung einer geeigneten Haltemöglichkeit automatisch weiterfährt, bevor die dadurch ansteigende Betriebsgefahr im Vergleich zum Abstellen des Fahrzeugs im aktuellen Fahrstreifen zu hoch wird. Wünschenswert wäre eine automatische Weiterfahrt bis in ein Krankenhaus, was u.a. aufgrund von Sensorungenauigkeiten und Schwächen in der Situationsinterpretation in naher Zukunft nicht realisierbar sein wird. Durch die Bestimmung der Kritikalität für bestimmte Fahrmanöver (Fahrstreifenwechsel, Folgefahrt) ließe sich zumindest eine Art Funktionsbaukasten risikominimaler Fahrmanöver für verschiedene Verkehrssituationen ableiten. Eine Erhöhung der Systemkomplexität wird allerdings hinsichtlich der Systemfreigabe zu einer ähnlichen Problematik führen, wie sie von Winner et al. für die Zulassung von komfortsteigernde hoch- und vollautomatische Fahrfunktion aufgezeigt wurde [145].

Hinsichtlich der Erkennung von medizinischen Notfällen konnten relevante Notfälle identifiziert und Ansätze für deren sensorische Erkennung aufgezeigt werden. Eine Verbesserung der automatisierten Erkennung von kardiovaskulären Notfällen im Fahrzeug lässt sich zukünftig durch eine differenzierte Betrachtung von Störeinflüssen auf die betrachteten Messverfahren erzielen. Zur Verbesserung der kapazitiven Verfahren gilt es zu untersuchen, welchen Einfluss verschiedene Kleidungsmaterialien auf die Messung haben und wie sich Bewegungsartefakte gezielt erkennen lassen. Das kamerabasierte Verfahren lässt sich voraussichtlich durch eine externe Messung von Lichtartefakten sowie durch robustere Algorithmen zur Verfolgung der Gesichtsbewegungen erzielen (Tracking).

Unabhängig von den Messverfahren zur Detektion der Notfälle werden genauere Untersuchungen zu den Abläufen von medizinischen Notfällen zu einer Verbesserung der Systemgestaltung

beitragen können. So gilt es beispielsweise zu betrachten, wie lange ein Mensch nach dem Eintreten eines kardiovaskulären Notfalls (z. B. Herzinfarkt) noch handlungsfähig ist und bis zu welchem Zeitpunkt er in der Lage sein wird, ein NHA manuell zu aktivieren. Im umgekehrten Fall gilt es zu betrachten, ob eine versehentliche Deaktivierung des Systems vermeidbar ist, wie es bspw. durch Krampfanfälle oder das Zusammensacken des Fahrers über dem Lenkrad auftreten kann. Die Qualität der automatisierten Erkennung von medizinischen Notfällen wird somit maßgeblich die rechtzeitige Erkennung dieser Notfälle sowie die Anzahl von Fehlauflösungen beeinflussen. Während zu viele Fehlauflösungen ein derartiges System für den Kunden unzumutbar machen, kann eine zu späte Auslösung zum Abkommen des Fahrzeugs von der Fahrbahn führen.

Über die Grenzen der medizinischen Notfälle hinaus ergeben sich Möglichkeiten zur Erweiterung des Wirkungsfelds von NHA. So ist eine manuelle Aktivierung eines NHA denkbar, wenn der Fahrer bspw. aufgrund eines Niesanfalls oder einer plötzlichen Einschränkung seines Sehvermögens, z. B. durch das Verrutschen von Kontaktlinsen, kurzzeitig in der Ausübung seiner Fahraufgaben eingeschränkt wird. Ebenfalls ist es denkbar, Systeme zur Detektion von Müdigkeit mit NHA zu koppeln.

Des Weiteren werden NHA die Rückfallebene für die Realisierung von hoch- und vollautomatisierten Fahrfunktionen darstellen. Sobald eine hoch- oder vollautomatische Fahrfunktion an ihre Systemgrenzen stößt und der Fahrer gleichzeitig auf eine Übernahmeaufforderung nicht reagiert, wird die Aktivierung eines NHA notwendig sein, um Fahrzeuge kontrolliert in einen risikominimalen Zustand zu überführen [144]. Bei allen Anwendungsszenarien von NHA wird es allerdings notwendig sein, die Folgen eines Fehlgebrauchs der Systeme durch geeignete HMI-Konzepte bestmöglich zu entschärfen.

A Anhang

A.1 Systemarchitektur für ein Nothalteassistenzsystem

Nachfolgend wird gezeigt, wie die Kostenfunktionen zur Bewertung der Bahnplanungstrajektorien berechnet werden (zwischen dem Startzeitpunkt t_0 und dem Endzeitpunkt τ des aktuellen Planungsabschnitts) (in Anlehnung an [52]).

Kostenfunktionen zur Bewertung der Längs- und Querbeschleunigung \ddot{s} , \ddot{d} :

$$k_{\ddot{s},i} = \int_{t_0}^{\tau} (\ddot{s}(t))^2 dt$$

$$k_{\ddot{d},i} = \int_{t_0}^{\tau} (\ddot{d}(t))^2 dt$$

Kostenfunktionen zur Bewertung der Längsgeschwindigkeit \dot{s} (Die Zielgeschwindigkeit $\dot{s}(\tau)$ ergibt sich je nach Zielpunkt $\xi(\tau)$ aus der Folgegeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug, der mittleren Geschwindigkeit der Ziellücke oder der Mindestgeschwindigkeit für den aktuellen Fahrstreifen):

$$k_{\dot{s},i} = \int_{t_0}^{\tau} (\dot{s}(t) - \dot{s}(\tau))^2 dt$$

Kostenfunktionen zur Bewertung des aktuellen Fahrstreifens:

$$k_{FS,i} = \int_{t_0}^{\tau} (d(t) - d(\tau) - b_{FS})^2 dt$$

Kostenfunktionen zur Bestrafung von Trajektorien mit positiver Beschleunigungen:

$$k_{\ddot{s}>0,i} = \int_{t_0}^{\tau} \begin{cases} (\ddot{s}(t))^2 dt, & \ddot{s}(t) \geq 0, \\ 0 dt, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Für die Gewichtungsfaktoren g_j des NHA werden folgende Werte angenommen:

$$g_{\ddot{s}} = g_{\ddot{d}} = 0,1, \quad g_{\dot{s}} = 0,001, \quad g_{\ddot{s}>0} = 100, \quad g_{FS} = 1000.$$

Durch eine hohe Gewichtung des Fahrstreifenwechsels und der starken Bestrafung von positiven Beschleunigungen wird das gewünschte Verhalten des NHA sichergestellt. Den Geschwindigkeits- und Beschleunigungskosten werden verhältnismäßig geringe Gewichtungen zugewiesen, da der Komfortaspekt für ein NHA sekundär ist. Ein gewisser Anteil verhindert allerdings das sprunghafte Ansteigen der Ausgangsgrößen, was zu Fehlern in der Ansteuerung der Aktuator-Schnittstellen führen kann.

A.2 Erkennung von medizinischen Notfällen im Fahrzeug

Zeit [min:sek]	Art der Lichtartefakte
00:00	Start der Messung
00:06	Lichtimpuls
00:14	Lichtimpuls
00:19	Lichtimpuls
00:28	Lichtimpuls
00:30 - 00:59	Lichtimpulste mit einer Frequenz von ca. 1 Hz
01:00 - 01:29	Lichtimpulste mit einer Frequenz von ca. 2 Hz
01:34	Lichtimpuls
01:39	Lichtimpuls
01:46	Lichtimpuls
01:54	Lichtimpuls
02:00 - 02:29	Lichtimpulste mit einer Frequenz von ca. 1 Hz
02:30 - 02:59	Lichtimpulste mit einer Frequenz von ca. 2 Hz
03:00	Ende der Messung

Tabelle A-1: Zeitpunkte und Art der eingeleiteten Lichtartefakte während der Probandenstudie (aus [16])

Zeit [min:sek]	Beeinflussung der Bewegungsartefakte
00:00	Start der Messung
00:05	Einzelner Impuls
00:17	Einzelner Impuls
00:22	Einzelner Impuls
00:29	Einzelner Impuls
00:49	Einzelner Impuls
00:55	Einzelner Impuls
00:57	Einzelner Impuls
01:06	Einzelner Impuls
01:13	Einzelner Impuls
01:30 - 2:59	Impulse mit einer Frequenz von ca. 1 Hz
03:00	Ende der Messung

Tabelle A-2: Zeitpunkte und Art der in die Sitzkiste eingeleiteten Impulse während der Probandenstudie (Phase „Passive Bewegungen“) (aus [16])

Zeit [min:sek]	Aktion	Beschreibung
00:00	Start der Messung	
00:07	Anfahren	- Gaspedal betätigen
00:12	Links abbiegen	- Bremspedal betätigen - Schulterblick links - Lenkrad nach links bis zum Anschlag drehen - Lenkrad zurückdrehen - Gaspedal betätigen
00:24	Fahrstreifenwechsel links	- Schulterblick links - Lenkrad um 45° nach links drehen - Lenkrad zurück drehen
00:31	Fahrstreifenwechsel rechts	- Schulterblick rechts - Lenkrad um 45° nach rechts drehen - Lenkrad zurückdrehen
00:47	Stopp	- Bremspedal betätigen - Nach links/rechts schauen - Gaspedal betätigen
01:07	Rechtskurve	- Bremspedal betätigen - Lenkrad um 45° nach rechts drehen - Lenkrad zurückdrehen - Gaspedal betätigen
01:17	Linkskurve	- Bremspedal betätigen - Lenkrad um 45° nach links drehen - Lenkrad zurückdrehen - Gaspedal betätigen
01:25	Überholen	- Schulterblick links & Blick in den linken Spiege - Gaspedal betätigen - Lenkrad um 90° nach links drehen - Schulterblick rechts & Blick in den rechten Spiegel - Lenkrad zurückdrehen
01:43	Links abbiegen	- s.o.
02:00	Radio bedienen	- Die Navigations-Taste des Radios betätigen.
02:14	Rechts abbiegen	- Bremspedal betätigen - Schulterblick rechts - Lenkrad bis zum Anschlag nach rechts drehen - Lenkrad zurückdrehen - Gaspedal betätigen
02:32	Spurwechsel rechts	- s.o.
02:43	Rechts abbiegen	- s.o.
02:55	Anhalten	- Bremspedal betätigen
03:00	Ende der Messung	

Tabelle A-3: Ablauf der Fahrmanöver während der Phase „Aktive Bewegung“(aus [16])

Probanden- Nummer	Geschlecht	Alter	Gewicht [kg]	Körper- größe [cm]	Kleidungs- schichten	Material der Kleidung	Bart- träger	Brillen- träger
1	M	22	67	181	T	95% B, 5% V	N	N
2	M	25	70	178	T, T	100% B, 100% B	N	N
3	M	22	105	195	T	100% B	J	N
4	M	29	87	187	H, P	100% B, 100% B	N	N
5	M	27	65	165	T, P	100% B, 100% B	N	N
6	M	23	83	181	T	100% B	N	N
7	M	23	72	176	T, P	100% B, 100% B	J	N
8	M	29	105	191	T, T	100% B, 100% B	J	J
9	W	25	78	175	T	94% B, 6% E	N	J
10	M	27	67	177	T, H	100% B, 100% B	N	J
11	M	27	55	168	H, P	100% B, 100% B	N	N
12	M	26	88	175	T, T	100% B, 100% B	J	N
13	M	28	94	188	T, P	100% B, 100% B	N	N
14	M	30	76	180	H	100% B	N	N
15	M	29	59	168	T, H	100% B, 100% B	N	J
16	W	25	76	168	T, T	100% V, 100% B	N	J
17	M	29	90	183	H	100% B	N	N
18	M	24	86	187	T, P	100% B, 100% B	N	N
19	W	29	70	174	T T	95% B, 5% E 100% B	N	N
20	M	34	80	182	T	100% B, 100% B	J	N
21	M	25	80	183	H	17% B, 83% P	N	J
22	M	46	130	189	T, T	100% B, 100% B	J	J
23	M	27	80	170	T	100% B	J	J
24	M	26	85	186	T, H	100% B, 100% B	N	N
25	W	26	60	172	T H	95% B, 5% E 100% B	N	N
26	M	29	74	183	T, H	100% B, 100% B	N	N
27	W	20	78	174	T	94% B, 6% E	N	J

Tabelle A-4: Probandeneigenschaften der 27 Probanden (aus [16])

Legende:

- Geschlecht: M - männlich, W - weiblich
- Kleidungsschichten: T - T-Shirt, H - Hemd, P - Pullover
- Kleidungsmaterial: B - Baumwolle, V - Viskose, E - Elasthan
- Sonstige: J - ja, N - nein

A.3 Warnstrategien für ein kooperatives Fahrstreifenwechselmanöver

Variante	Phasenlänge in s			
	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Gesamt
Warnblinklicht (WB)	4,5	4,8	3,2	12,5
Warnblinklicht + Schlangenlinie (SL)	3,5	7,3	3,8	14,6
Warnblinklicht + Spurversatz (WBS)	4,5	5,0	3,2	12,7
Warnblinklicht und Fahrtrichtungsanzeiger rechts im Wechsel + Spurversatz (WBBR)	3,4	7,4	5,6	16,4

Tabelle A-5: Phasenlängen der Warnstrategien innerhalb der Probandenstudie (aus [18])

B Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	A nalyzis o f V ariance (zu Deutsch: Varianzanalyse)
ABS	A ntiblockiersystem (Automatischer Blockierverhinderer)
ACC	A daptive C ruise C ontrol (Abstandsregeltempomat)
ADAS	A dvanced D river A ssistance S ystem (zu Deutsch: Fahrerassistenzsystem)
AG	A mtsgericht
ASIL	A utomotive S afety I ntegrity L evel
BAST	B undesanstalt für S traßenwesen
BGB	B ürgerliches G esetz b uch
BGH	B undesgerichtshof
BL	B remsleuchte
bpm	b eats p er m inute (zu Deutsch: Schläge pro Minute)
cEKG	c apazitive e lectrocardiogram (zu Deutsch: Kapazitives Elektrokardiogramm)
CoP	C ode o f P ractice
DIN	D eutsches I nstitut für N ormung
ECE	E conomic C ommission for E urope
E/E/PE	e lektrisch/ e lektronisch/ p rogrammierbar elektronisch
EG	E uropäischen G emeinschaft
EKG	E lektro k ardiogram
EN	E uropäische N orm
ESC	E lectronic S tability C ontrol (z. B. das Elektronische Stabilitätsprogramm ESP)
F	F olgepunkt
FF	F estforderung
FFT	F ast F ourier t ransform (zu Deutsch: schnelle Fourier-Transformation)

fps	f rames p er s econd (zu Deutsch: Bilder pro Sekunde)
FR	F ahr r ichtungsanzeiger
FR	F ragestellung
FSW	F ahr s treifen w echsel
FZS	F ahrer z ustand s ensorik
FZV	F ahrzeug- Z ulassungs v erordnung
GIDAS	G erman I n- D epth A ccident S tudy
G & R	G efahren- und R isikoanalyse nach ISO 26262
HMI	H uman M achine I nterface (zu Deutsch: Mensch-Maschine-Schnittstelle)
HR	H erzrate
HRV	H erzraten v ariabilität
ICA	Independant C omponent A nalysiz (zu Deutsch: Unabhängigkeitsanalyse)
ICD	i mplantable c ardioverter- d efibrillator (zu Deutsch: Implantierbarer Kardioverter-Defibrillator)
IEC	I nternational E lectronical C ommission
ISO	I nternational O rganization for S tandardization
LED	L ight- e mitting d iode
Lidar	L ight d etection a nd r anging
LM	L ücken m ittelpunkt (Mittelpunkt einer Verkehrslücke)
LRR	L ong R ange R adar (zu Deutsch: Fernbereichsradar)
MRR	M id R ange R adar (zu Deutsch: Nahbereichsradar)
NHA	N othalte a ssistenzsystem
NZV	N eu e Z eitschrift für V erkehrsrecht (Zeitschrift)
OLG	O ber l andes g ericht
PfIVG	P flicht v ersicherung s gesetz
PMD	P hotonic M ixer D evice
ProdHaftG ..	P roduk t haftung s gesetz
RNS	R adionavigation s ystem
SL	Variante 2 der Probandenstudie in Kapitel 5 (S chl l angenlinien)
SOP	S tart o f P roduction (zu Deutsch: Beginn der Serienproduktion)
StGB	S tra f gesetz b uch
StPO	S tra f prozess o rdnung
StVG	S traßen v erkehr s gesetz

StVO	S traßen v erkehrs- O rdnung
StVZO	S traßen v erkehrs- Z ulassungs- O rdnung
T	T ransition (innerhalb einer Zustandsmaschine)
VVG	V ersicherungs v ertrags g esetz
WB	W arn b linklicht
WB	Variante 1 der Probandenstudie in Kapitel 5 (W arn b linklicht)
WBBR	Variante 4 der Probandenstudie in Kapitel 5 (W arn b linklicht und B linker rechts im Wechsel)
WBS	Variante 3 der Probandenstudie in Kapitel 5 (W arn b linklicht und S purversatz)
WF	W unsch f orderung
WÜ-StV	W iener Ü bereinkommen über den S traßen v erkehr
Z	Z ustand (innerhalb einer Zustandsmaschine)

C Symbolverzeichnis

Allgemeine Symbole

$:=$	Definition	./.
$ x $	Betrag einer Größe x	./.
\bar{x}	Mittelwert einer Größe x	./.
$\dot{x}, \ddot{x}, \dddot{x}$	Erste, zweite und dritte Ableitung einer Größe x nach der Zeit	./.
x^T	Transponierte einer Größe x	./.
$\sigma(x)$	Standardabweichung einer Größe x	./.
i, j	Zählindizes	./.
t	Zeit	s

Symbole in Kapitel 3

\sim	Negation einer Transition	./.
\vee	„ODER“ - Verknüpfung zwischen Transitionen	./.
\wedge	„UND“ - Verknüpfung zwischen Transitionen	./.
α	Öffnungswinkel	°
ξ	Zustandsvektor einer Bewegung	./.
ξ_1	Wegkomponente des Zustandsvektors ξ	m
ξ_2	Geschwindigkeitskomponente des Zustandsvektors ξ	m/s
ξ_3	Beschleunigungskomponente des Zustandsvektors ξ	m/s ²
$\xi(\tau)$	Endzustand	./.
τ	Endzeitpunkt einer Trajektorie	s
τ_{\min}, τ_{\max}	minimaler und maximaler Endzeitpunkt einer Trajektorie	s
ψ	Lagrange-Multiplikator	./.
a	Beschleunigung	m/s ²
a_{\max}	Maximalbeschleunigung	m/s ²

b_{FS}	Fahrstreifenbreite	m
c_0, \dots, c_5	Polynomkoeffizienten	./.
d	Euklidischer Abstand zur Referenzkurve	m
f_0	Energiefunktion	./.
$f(\xi, u)$	Integratorsystem	./.
$g_{\ddot{a}}$	Gewichtsfaktor zur Querbeschleunigung	./.
g_{FS}	Gewichtsfaktor zur Bewertung des aktuellen Fahrstreifens	./.
g_j	Gewichtsfaktor der Kostenfunktion j	./.
$g_{\dot{s}}$	Gewichtsfaktor zur Längsgeschwindigkeit	./.
$g_{\ddot{s}}$	Gewichtsfaktor zur Längsbeschleunigung	./.
$g_{\ddot{s}>0}$	Gewichtsfaktor zur Bestrafung positiver Beschleunigungen	./.
J_x	durch x spezifiziertes Kostenfunktional	./.
K	Kostenfunktion	./.
K_i	Kostenfunktion der Trajektorie i	./.
$K_{d,i}$	Kostenfunktion der Trajektorie i in Querrichtung	./.
$K_{s,i}$	Kostenfunktion der Trajektorie i in Längsrichtung	./.
$k_{\ddot{d},i}$	Kostenfunktion zur Bewertung der Querbeschleunigung	./.
$k_{\text{FS},i}$	Kostenfunktion zur Bewertung des aktuellen Fahrstreifens	./.
k_j	Einzelkosten	./.
$k_{\dot{s},i}$	Kostenfunktion zur Bewertung der Längsgeschwindigkeit	./.
$k_{\ddot{s},i}$	Kostenfunktion zur Bewertung der Längsbeschleunigung	./.
$k_{\ddot{s}>0,i}$	Kostenfunktion zur Bestrafung positiver Beschleunigungen	./.
\mathcal{L}	Lagrange-Funktion	./.
M	Komponentenmatrizen von ξ	./.
n_x, t_x	durch x spezifizierter Normal- und Tangentialvektor	./.
S	Sensorreichweite	m
s	zurückgelegte Wegstrecke des Fußpunkts	m
t_0	Anfangszeitpunkt	s
u	Stellgröße (hier: Ruck)	m/s ³
v	Geschwindigkeit	m/s
v_{max}	Maximalgeschwindigkeit	m/s

Symbole in Kapitel 4

C	Kanal des kapazitiven EKG	./.
FAR	Fehlannotationsrate	%
FAR_{cEKG}	Fehlannotationsrate des cEKG	%
$FAR_{cEKG,i,j}$	Fehlannotationsrate des cEKG für Kanal j des Probanden i	%
$FAR_{cEKG,mean,i}$..	Mittlere Fehlannotationsrate des cEKG für den Probanden i über alle Kanäle	%
$\overline{FAR}_{cEKG,mean}$..	Über alle Probanden gemittelter Mittelwert der Einkanaldek- tektionen	%
$FAR_{cEKG,multi,i}$..	Durch Mehrkanaldetektion erzielte Fehlannotationsrate des cEKG für den Probanden i	%
$\overline{FAR}_{cEKG,multi}$..	Über alle Probanden gemittelte Mehrkanaldetektion	%
$ \overline{FAR} _{cEKG,diff}$..	Über alle Probanden gemittelte Differenz zwischen $FAR_{cEKG,mean,i}$ und $FAR_{cEKG,multi,i}$	%
FN	Anzahl der falsch negativen Ereignisse (false negative)	./.
FP	Anzahl der falsch positiven Ereignisse (false positive)	./.
$HR_{mean,cEKG}$	Mittlere Herzrate des kapazitiven EKG	bpm
$HR_{mean,cEKG,i}$	Mittlere Herzrate des kapazitiven EKG zum Zeitpunkt t_i	bpm
$\overline{HR}_{diff,cEKG}$	Mittlere Differenz zwischen der Herzrate des kapazitiven EKG und der Referenzherzrate über alle Probanden	bpm
$HR_{diff,cEKG,i}$	Mittlere Differenz zwischen der Herzrate des kapazitiven EKG und der Referenzherzrate für den Probanden i	bpm
$HR_{mean,cam}$	Mittlere Herzrate der kamerabasierten Plethysmographie	bpm
$HR_{mean,cam,i}$	Mittlere Herzrate der kamerabasierten Plethysmographie zum Zeitpunkt t_i	bpm
$\overline{HR}_{diff,cam}$	Mittlere Differenz zwischen Kamera- und Referenzherzrate über alle Probanden	bpm
$HR_{diff,cam,i}$	Mittlere Differenz zwischen Kamera- und Referenzherzrate für den Probanden i	bpm
$HR_{mean,ref}$	Mittlere Herzrate des Referenz-EKG	bpm
$HR_{mean,ref,i}$	Mittlere Herzrate des Referenz-EKG zum Zeitpunkt t_i	bpm
P	Proband	./.
R	Anzahl der Referenzherzschläge	./.
TP	Anzahl der richtig positiven Ereignisse (true positive)	./.

D Literaturverzeichnis

- [1] ABENDROTH, B.; BRUDER, R.: *Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung*. In: WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Vieweg+Teubner Verlag, Berlin, 2012.
- [2] ABENDROTH, B.; BRUDER, R.; FUCHS, K.; SCHRAMM, T.: *Beurteilung von Systemen im Fahrzeug – welche Messmethoden sind geeignet?* Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 63(3):223–231, 2009.
- [3] ACHARYA, U.R.; JOSEPH, K.P.; KANNTHAL, N.; LIM, C.M.; SURI, J.S.: *Heart rate variability: a review*. Medical & Biological Engineering & Computing, 2006:1031–1051, 44.
- [4] AG WILHELMSHAVEN: 29. 10. 2002, 6 C 602/02(I), NZV 2003, 181: *Mithaftung wegen grundloser Langsamkeit auf Autobahn*.
- [5] ALAMETHÄ, J.; VÄRRI, A.; KOIVULUOMA, M.; BARNA, L.C.: *The Potential of EMFi Sensors in Heart Activity Monitoring*, 2004.
- [6] ALEKSANDROWICZ, A.; LEONHARDT, S.: *Wireless and Non-contact ECG Measurement Systeme - the "Aachen SmartChair"*. Acta Polytechnica, 47(4-5):68–71, 2007.
- [7] ARDELT, M.: *Hybrid Control Strategies for Advanced Safety- and Driver Assistance Systems*. Dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [8] AUDI MEDIASERVICES: *Die Fahrerassistenzsysteme von heute* (<https://www.audi-mediaservices.com>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [9] BARTELS, A.; MIRWALDT, P.: *Verfahren zur Detektion ballistokardiogener und/oder atmungsbedingter Bewegungen einer auf einem Kraftfahrzeugsitz sich befindenden Person sowie Messanordnung zur Durchführung des Verfahrens* (Offenlegungsschrift DE 10 2011 113 100 A1), 2013.
- [10] BARTHELMESS, W.; BARTHELMESS, M.: *Verkehrskognition – wie Verkehrsteilnehmer ihre Wahrnehmung organisieren und Erfahrung bilden*. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, (1):25–34, 2011.
- [11] BAUMERT, M.; BAIER, V.; HAUEISEN, J.; WESSEL, N.; MEYERFELDT, U.; SCHIRDEWAN, A.; VOSS, A.: *Forecasting of life threatening arrhythmias using the compression entropy of heart rate*. Methods of Information in Medicine, 43(2):202–206, 2004.
- [12] BEDNY, G.; MEISTER, D.: *Theory of Activity and Situation Awareness*. International Journal of Cognitive Ergonomics, 3(1):63–72, 1999.
- [13] BENMIMOUN, A.; NEUNZIG, D.; MAAG, C.: *Effizienzsteigerung durch professionelles/partnerschaftliches Verhalten im Straßenverkehr*, 2004.
- [14] BEWERSDORF, C.: *Zulassung und Haftung bei Fahrerassistenzsystemen im Straßenverkehrs: Zur Verantwortlichkeit von Staat, Fahrer, Halter und Hersteller für die Sicherheit des Straßenverkehrs*, 2005.
- [15] BGH: 10.01.1995, VI ZR 247/94, NZV 1995, 145: *Betriebsgefahr bei nicht unfallkausaler Fahruntüchtigkeit*.

- [16] BRAER, M.: *Entwicklung und Evaluation eines Messstands zur kontaktlosen Erfassung von Vitalparametern*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2013.
- [17] BREUER, D.: *Toyota entwickelt neue Technologien - besonderer Schutz für Fußgänger und ältere Verkehrsteilnehmer*, Pressebericht, 2011.
- [18] BROUWER, N.: *Untersuchung eines kooperativen Fahrstreifenwechselmanövers für ein Nothalteassistenzsystem im Rahmen einer Probandenstudie*. Bachelor-Thesis, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2012.
- [19] BUSCHBELL, H.: *Münchener Anwalts Handbuch Straßenverkehrsrecht*. Verlag C. H. Beck oHG, München, 3. Auflage, 2009.
- [20] CHAMADIYA, B.K.; HEUER, S.; HOFMANN, U.G.; WAGNER, M.: *Towards a capacitively coupled electrocardiography system for car seat integration*. 4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering IFMBE Proceedings, 22:1217–1221, 2009.
- [21] CHAMADIYA, B.K.; HOFMANN, U.G.; WAGNER, M.; MEINEL, H.H.: *Capacitive Coupled Electrocardiography Measurements employing flexible Electrodes in a Car Seat: Project Report INSITEX*, 2009.
- [22] CHEN, J.: *Fahrerassistenzsystem zum autonomen Spurwechsel*. Disseration, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2009.
- [23] CHENG, L.H.H.; WHITTINGTON, R.M.: *Natural deaths while driving: would screening for risk be ethically justified?* Journal of Medical Ethics, 24:248–251, 1998.
- [24] CHRISTIAN, M.S.: *Incidence and implications of natural deaths of road users*. British Medical Journal (International Edition), 297(6655):1021–1024, 1988.
- [25] CURIC, A.; MÄNNER, H.; MEISSNER, S.; MORAWETZ, F.: *Untersuchung zur Herzratenvariabilität unter Stress- und Entspannungs-Bedingung*, Universität Regensburg, 2007.
- [26] CZAPLIK, M.; EILEBRECHT, B.; NTOUBA, A.; WALTER, M.; SCHAUERTE, P.; LEONHARDT, S.; ROSSAINT, R.: *Clinical proof of practicability for an ECG device without any conductive contact*. Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering, 55(5):291–300, 2010.
- [27] DANDRIDGE, A.; TVETEN, A.B.; SIGEL, G.H.; WEST, E.J.; GIALLORENZI, T.G.: *Optical fibre magnetic field sensors*. Electronics Letters, 16(11), 1980.
- [28] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *2007/46/EG Richtlinie zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge*, 2007.
- [29] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *2009/661/EG Verordnung über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen, Kraftfahrzeuganhängern und von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer allgemeinen Sicherheit*, 2009.
- [30] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 9241 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion*, 2006.
- [31] DIEHL, M.; CLASSEN, V.; KOCHSIEK, K.: *Innere Medizin* Urban & Fischer bei Elsev, 5. Auflage, 2004.
- [32] DOMÍNGUEZ, R.; ONIEVA, E.; ALONSO, J.; VILLAGRA, J.; GONZÁLEZ, C.: *LIDAR based Perception Solution for Autonomous Vehicles*, 2011.

- [33] ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (ECE): *UN-ECE-R 48 Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices*, 2010.
- [34] ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (ECE): *UN-ECE-R 79 Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to steering equipment*, 2005.
- [35] EHMANN, D.: *Modellierung des taktischen Fahrerverhaltens bei Spurwechselvorgängen*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2003.
- [36] EILEBRECHT, B.; CZAPLIK, M.; WALTER, M.; WARTZEK, T.; ROSSAINT, R.; LEONHARDT, S.: *Implementation of a capacitive ECG measurement system in clinical practice: an interim report*. IFMBE Proceedings World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, 25(7):370–372, 2009.
- [37] ELLINGHAUS, D.: *Rücksichtslosigkeit und Partnerschaft: Eine sozialpsychologische Untersuchung über den Umgang unter Kraftfahrern im Straßenverkehr*, 1986.
- [38] ENDSLEY, M.R.: *Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems*. Human Factors, 37(1):32–64, 1995.
- [39] FLETCHER, R.; KULKARNI, S.: *Clip-on wireless wearable microwave sensor for ambulatory cardiac monitoring*, Band 2010, 2010.
- [40] FOGOROS, R.N.: *How Does Having an Implantable Defibrillator Affect Your Lifestyle?* (<http://heartdisease.about.com/>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [41] GAMERO, L.G.; VILA, J.; PALACIOS, F.: *Wavelet transform analysis of heart rate variability during myocardial ischaemia*. Medical and Biological Engineering and Computing, 40(1):72–78, 2002.
- [42] GARBE, A.; HAGEDORN, T.: *Die zivilrechtliche Haftung beim Verkehrsunfall*. JuS 2004, Seiten 287–294, 2004.
- [43] GASSER, T.; ARZT, C.; AYOUBI, M.; BARTELS, A.; EIER, J.; FLEMISCH, F.; HÄCKER, D.; HESSE, T.; HUBER, W.; LOTZ, C.; MAURER, M.; RUTH-SCHUMACHER, S.; SCHWARZ, J.; VOGT, W.: *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, F 83, 2012.
- [44] GEKLE, M.; WISCHMEYER, E.; GRÜNDER, S.; PETERSEN, M.; SCHWAB, A.: *Taschenlehrbuch Physiologie*. Georg Thieme Verlag KG, 2010.
- [45] GELAU, C.; GASSER, T.M.; SEECK, A.: *Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit*. In: WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Seiten 24–42. Vieweg+Teubner Verlag, Berlin, 2012.
- [46] GIUSTI, A.; ZOCCHI, C.; ADAMI, A.; SCARAMELLINI, F.; ROVETTA, A.: *Methodology of evaluating the driver's attention and vigilance level in an automobile transportation using intelligent sensor architecture and fuzzy logic*, 2007.
- [47] GREGER, R.: *Haftungsrecht des Straßenverkehrs: Handbuch und Kommentar*. DE Gruyter, 4. Auflage, 2007.
- [48] GUGERTY, L.: *Situation awareness during driving: Explicit and implicit knowledge in dynamic spatial memory*. Journal of Experimental Psychology: Applied, 3(1):42–66, 1997.
- [49] GUGERTY, L.: *Situation awareness in driving*. In: FISHER, D.L.; RIZZO, M.; CAIRD, J.K.: *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology*. CRC Press, 2011.

- [50] HÄDRICH, P.: *Analyse von Behandlungsfehlervorwürfen aus den Fachgebieten der Anästhesie und Intensivmedizin sowie Pflegefehlervorwürfen*. Dissertation, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2010.
- [51] HALINEN, M.; JAUSSE, A.: *Fatal road accidents caused by sudden death of the driver in Finland and Vaud, Switzerland*. European Heart Journal, 15(7):888–894, 1994.
- [52] HAMEL, S.: *Situationsadaptiver Fahrstreifenwechsel für ein Nothalteassistenzsystem auf einer Bundesautobahn*. Diplomarbeit, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2012.
- [53] HARGUTT, V.: *Das Lidschlussverhalten als Indikator für Aufmerksamkeits- und Müdigkeitsprozesse bei Arbeitshandlungen*. Dissertation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 2001.
- [54] HERZBERG, P.Y.; SCHLAG, B.: *Aggression und Aggressivität im Straßenverkehr*. Zeitschrift für Sozialpsychologie, 37(2):73–86, 2006.
- [55] HEUER, S.: *Ambiente kapazitive EKG-Messung: Elektroden, Systeme und Konzepte*. Dissertation, Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), 2011.
- [56] HORREY, W.J.; WICKENS, C.D.; CONSALUS, K.P.: *Modeling Drivers' Visual Attention Allocation While Interacting With In-Vehicle Technologies*. Journal of Experimental Psychology: Applied, 12(2):67–78, 2006.
- [57] HUHLE, R.; MALBERG, H.: *Studie zur Analyse von medizinisch bedingten Notfällen in Fahrzeugen*, Technische Universität Dresden, 2011.
- [58] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: *IEC 61508 Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/ elektronischer/ programmierbarer elektronischer Systeme*, 1998.
- [59] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: *ISO 15622 Intelligent transport systems - Adaptive Cruise Control systems - Performance requirements and test procedures*, 2010.
- [60] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO 26262 Road Vehicles - Functional Safety*, 2011.
- [61] JAUHAR, S.; SLOTWINER, D.J.: *The Economics of ICDs*. New England Journal of Medicine, 351(24):2542–2544, 2004.
- [62] JUNNILA, S.; AKHBARDEH, A.; BARNA, L.C.; DEFEE, I.; VÄRRI, A.: *A Wireless Ballistocardiographic Chair*. Proceedings of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference, 2006.
- [63] KÄMPCHEN, N.; WALDMANN, P.; HOMM, F.; ARDELT, M.: *Umfelderfassung für den Nothalteassistenten - ein System zum automatischen Anhalten bei plötzlich reduzierter Fahrtätigkeit des Fahrers*. Tagungsband der AAET – Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig, 2010.
- [64] KERNER, B.S.: *The Physics of Traffic*: S. 21. Springer, Berlin, 2004.
- [65] KIM, J.; HONG, J.; CHO, M.C.; CHA, E.J.; LEE, T.S.: *Wireless biomedical signal monitoring device on wheelchair using noncontact electro-mechanical film sensor*. Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS, Seiten 574–577, 2007.
- [66] KLEIN, H.H.; KRÄMER, A.; PIESKE, B.M.; TRAPPE, H.-J.; VRIES, H.: *Fahreignung bei kardiovaskulären Erkrankungen*. Der Kardiologe, 4(6):441–473, 2010.
- [67] KNAPP, A.; NEUMANN, M.; BROCKMANN M.; WALZ, R.; WINKLE, T.: *Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS: Response 3 (a PREVENT Project)*, 2008.

- [68] KORNAS, C.: *Der Regress des Kfz-Haftpflichtversicherers - Fahruntüchtigkeit*. NJW-Spezial 2013, S. 73, 2013.
- [69] KRAMME, R.: *Medizintechnik - Verfahren, Systeme, Informationsverarbeitung* Springer DE, Berlin, S. 118 f., 2011.
- [70] KULLMANN, H.: *Produkthaftung für Verkehrsmittel - Die Rechtsprechung des Bundesgerichtshofes*. NZV 2002, 2002.
- [71] LEONHARDT, S.; ALEKSANDROWICZ, A.: *Non-contact ECG monitoring for automotive application*. 5th International Summer School and Symposium on Medical Devices and Biosensors, 2008.
- [72] LI, C.; ZHENG, C.; TAI, C.: *Detection of ECG characteristic points using wavelet transforms*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 42(1):21–28, 1995.
- [73] LIM, Y.G.; KIM, K.K.; PARK, K.S.: *ECT measurement on a chair without conductive contact*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 53(5):956–959, 2006.
- [74] LÜDERITZ, B.: *Herzrhythmusstörungen: Diagnostik und Therapie* Springer-Verlag Berlin Heidelberg New-York, 5. Auflage, S. 33 f., 1998.
- [75] MALIK, M.: *Heart rate variability - Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use*. European Heart Journal, 17:354–381, 1996.
- [76] MALMIVUO, J.; PLONSEY, R.: *Bioelectromagnetism - Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields: 6. The Heart*. Oxford University Press, New York, 1995.
- [77] MANI, V.; WU, X.; WOOD, M.A.; ELLENBOGEN, K.A.; HSIA, P.W.: *Variation of spectral power immediately prior to spontaneous onset of ventricular tachycardia/ventricular fibrillation in implantable cardioverter defibrillator patients*. Journal of Cardiovascular Electrophysiology, 10(12):1586–1596, 1999.
- [78] MANN, M.: *Benutzerorientierte Entwicklung und fahrergerechte Auslegung eines Querführungsassistenten*. Dissertation, 2008.
- [79] MIRWALDT, P.; BARTELS, A.; TO, T.-B.; BRAER, M.; MALBERG, H.; ZAUNSEDER, S.; LEMMER, K.: *Evaluation von Sensoren zur kontaktlosen Messung der Herzrate im Fahrzeug*. Tagungsband "Fahrer im 21. Jahrhundert", Braunschweig, 2013.
- [80] MIRWALDT, P.; BARTELS, A.; TO, T.-B.; PASCHEKA, P.; LEMMER, K.; ZAUNSEDER, S.; HUHLE, R.; MALBERG, H.: *Gestaltung eines Notfallassistentensystems bei medizinisch bedingter Fahruntüchtigkeit*. Tagungsband der 5. Tagung Fahrerassistenz, München, 2012.
- [81] MIRWALDT, P.; GRUNDLER, W.; BROUWER, N.; SCHAPER, M.; LEMMER, K.: *Untersuchung von Warnstrategien für ein kooperatives Fahrstreifenwechselmanöver eines Nothalteassistentensystems*. Tagungsband der AAET – Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig, 2013.
- [82] MONTEMERLO, M.; BECKER, J.; BHAT, S. ET AL.: *Junior: The Stanford entry in the Urban Challenge*. Journal of Field Robotics - Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge, Part II, 25(9):569–597, 2008.
- [83] MOTOZAWA, Y.; HITOSUGI, M.; KIDO, M. ET AL.: *Sudden death while driving a four-wheeled vehicle: an autopsy analysis*. Medicine, science, and the law, 48(1):64–68, 2008.
- [84] MOTOZAWA, Y.; YOKOYAMA, T.; HITOSUGI, M.; TOKUDOME, S.: *Analysis of sudden natural deaths while driving with forensic autopsy findings*, 2008.
- [85] MUJICIC, R.; FRIJTERS, P.: *Altruism in Society: Evidence from a Natural Experiment Involving Commuters*, 2011.

- [86] MÜLLER, A.: *Regress im Schadensausgleichsrecht unter besonderer Berücksichtigung des Privatversicherers*. Dissertation, Universität St. Gallen, Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften (HSG), 2006.
- [87] MÜLLER, T.; ROHLER, D.: *Automatisches Spurfahren auf Autobahnen*. In: ISERMANN, R.: *Fahrdynamik-Regelung*. Vieweg, S. 285–306, 2006.
- [88] MÜLLER, D.; AGRAWAL, R.; ARNTZ, H.R.: *How Sudden Is Sudden Cardiac Death?* *Circulation Journal of the American Heart Association*, (114):1146–1150, 2006.
- [89] N.N.: *Ergoneers GmbH* (<https://www.ergoneers.com>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [90] N.N.: *Krauss-Maffei Wegmann GmbH & Co. KG* (<http://www.kmweg.de/>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [91] N.N.: *Insitex - Aktive Insassen-Sicherheit durch Intelligente Technische Textilien* (<http://www.kmweg.de/>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [92] N.N.: *51-Jähriger erleidet Herzinfarkt am Steuer* (<http://www.tz-online.de/>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [93] N.N.: *Der Aufmerksamkeitsassistent Attention Assist warnt rechtzeitig vor dem gefährlichen Sekundenschlaf* (<http://www.daimler.com/>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [94] N.N.: *Lexus Gesichtsfeldmonitor* (<http://www.lexus.de/range/ls/key-features/safety/safety-driver-monitoring-system.aspx>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [95] N.N.: *Mini Cooper misst Herzfrequenz* (<http://www.heise.de/newsticker/meldung/Mini-Cooper-misst-Herzfrequenz-1724967.html>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [96] N.N.: *Müdigkeitserkennung: Volkswagen AG* (<http://www.volkswagen.de/>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [97] N.N.: *Parklenkassistent "Park Assist" inkl. ParkPilot: Volkswagen AG* (<http://www.volkswagen.de/>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [98] N.N.: *Philips Vital Signs Camera* (<http://www.vitalsignscamera.com/>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [99] OEHLER, M.: *Kapazitive Elektroden zur Messung bioelektrischer Signale*: Dissertation. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2009.
- [100] OLG DÜSSELDORF: 23.10.1995, 1 U 183/94, NZV 1996, 113: *Telefonieren auf dem Seitenstreifen ist ordnungswidrig*.
- [101] OLSHAUSEN, K.E. VON: *EKG-Informationen*. Steinkopf Darmstadt, 2005.
- [102] OTTENBACHER, J.; HEUER, S.: *Motion Artefacts in Capacitively Coupled ECG Electrodes*. IFMBE Proceedings World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, 4(25):1059–1062, 2009.
- [103] PATAKI, K.; SCHULZE KISSING, D.; MAHLKE, S.; THÜRING, M.: *Anwendung von Usability-Maßnahmen zur Nutzeneinschätzung von Fahrerassistenzsystemen*. In: KARRER, K.; GAUSS, B.; STEFFENS, C.: *Beiträge zur Mensch-Maschine-Systemtechnik aus Forschung und Praxis*. Symposium Publishing, S. 211–228, 2005.
- [104] PETCH, M.C.; HALINEN, M.; BLOCK, P.; JAUSSE, A.; VARMA, M.: *Driving and heart disease*. *European Heart Journal*, 19:1165–1177, 1998.
- [105] PETERS, R.; DORNIEDEN, B.; SCHAPER, T.; JUNGE, L.; WEISER, A.: *FAMOS Schlussbericht*, 31.03.2012.

- [106] PETERS, E.; PRITZKULEIT, R.; BESKE, F.; KATALINIC, A.: *Demografischer Wandel und Krankheitshäufigkeiten*. Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz, 53(5):417–426, 2010.
- [107] PETERSON, B.; PETTY, C.: *Sudden natural death among automobile drivers*. Journal of Forensic Sciences, 7(3):274–285, 1962.
- [108] POH, M.-Z.; MCDUFF, D.J.; PICARD, R.W.: *Non-contact, automated cardiac pulse measurements using video imaging and blind source separation*. Optics Express, 18(10), 2010.
- [109] POSTOLACHE, O.A.; SILVA GIRAIO, P.M.; MENDES, J.; PINHEIRO, E. C.; POSTOLACHE, G.: *Physiological Parameters Measurement Based on Wheelchair Embedded Sensors and Advanced Signal Processing*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 59(10):2564–2574, 2010.
- [110] PRAHL, S.: *Optical Absorption of Hemoglobin* (<http://omlc.ogi.edu/spectra/hemoglobin/>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [111] PRAT, A.C.: *Sensordatenfusion und Bildverarbeitung zur Objekt- und Gefahrenerkennung*. Dissertation, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2010.
- [112] PUDENZ, K.: *Head-up-Display und Multifunktionskamera: der Mini wird zum Fahrer-Assistent* (<http://www.springerprofessional.de/>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [113] PURSCHE, T.; KRAJEWSKI, J.; MOELLER, R.: *Video-based Heart Rate Measurement From Human Faces*. 2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Berlin, 2012.
- [114] RASCH, B.; FRIESE, M.; HOFMANN, W.J.; NAUMANN, E.: *Quantitative Methoden, 2. Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*, Band 2, Springer, 2010.
- [115] ROBERT BOSCH GMBH: *Datenblatt Fernbereichsradsensor LRR3: Long-Range Radar, 3. Generation*, 2009.
- [116] ROBERT BOSCH GMBH: *Bosch Side View Assist* (<http://www.bosch-kraftfahrzeugtechnik.de>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [117] ROUTLEY, V.; STAINES, C.; BRENNAN, C.; NAWORTH, N.; OZANNE-SMITH, J.: *Suicide and natural deaths in road traffic – Review*, 2003.
- [118] RUCHATZ, T.: *Vision und Möglichkeiten des automatischen Fahrens: The vision of automatic driving and its opportunities*, VDA - Technischer Kongress, 2013.
- [119] RUNGE, E.: *Smarte Lösungen für Senioren von morgen* (<http://www.siemens.com/>, zuletzt geprüft am: 14.11.2013).
- [120] SCHRÖDER, J.: *Adaptive Verhaltensentscheidung und Bahnplanung für kognitive Automobile*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2009.
- [121] SCHULZE, M.; MÄKINEN, T.; IRION, J.; FLAMENT, M.; KESSEL, T.: *Preventive and Active Safety Applications Integrated Project PREVENT: IP Deliverable IP_D15: Final Report*, 2008.
- [122] SCHWARZ, F.; DECKE, R.: *Kooperatives Verhalten bei Nothalt-Manövern: Verhaltenswirksamkeit und Verständlichkeit von Anzeige Konzepten und Fahrmanövern: BMW Group Forschung und Technik, München*. In: VDI-Berichte, Band 2134, Seiten 327–336, 2011.
- [123] SEECK, A.; GASSER, T.M.: *Klassifizierung und Würdigung der rechtlichen Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit der Einführung moderner FAS*, 2007.

- [124] SERTEYN, A.; LIN, X.; AMFT, O.: *Reducing Motion Artifacts for Robust QRS Detection in Capacitive Sensor Arrays*. Proceedings of the 4th International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, 2011.
- [125] SPIES, M.; SPIES, H.: *Automobile Lidar Sensorik: Stand, Trends und zukünftige Herausforderungen*. Advances in Radio Science, 4:99–104, 2006.
- [126] STÄNDER, T.: *Eine modellbasierte Methode zur Objektivierung der Risikoanalyse nach ISO 26262*. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2010.
- [127] STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND: *Die häufigsten Todesursachen in Deutschland 2011*.
- [128] STEFFEN, M.; LEONHARDT, S.: *Non-Contact Monitoring of Heart and Lung Activity by Magnetic Induction Measurement*. Acta Polytechnica, 18(3):71–78, 2008.
- [129] SWITKES, J.P.: *Handwheel Force Feedback for Lanekeeping Assistance: Combined Dynamics, Stability and Bounding*. Dissertation, Stanford University, 2006.
- [130] TAVAKOLIAN, K.; ZADEH, F.M.; CHUO, Y.; VASEGHI, A.; KAMINSKA, B.: *Development of a Novel Contactless Mechanocardiograph Device*. International Journal of Telemedicine and Applications - Pervasive Health Care Services and Technologies, 2008(2), 2008.
- [131] TAYLOR, J.: *Medical aspects of fitness to drive: A guide for medical practitioners*, 1995.
- [132] TRZEBIATOWSKI, M.S.; GERN, A.; FRANKE, U.; KAEPLER, U.-P.; LEVI, P. VAN: *Detecting reflection posts - lane recognition on country roads*. Proceedings of the 2004 IEEE Intelligent Vehicle Symposium, 2004.
- [133] VIOLA, P.; LIENHART, R.: *Haar Feature-based Cascade Classifier for Object Detection*: Open CV, 2001.
- [134] WAGNER, G. VON: *Entwicklung von Methoden zur Echtzeitanalyse von EKG-Signalen mit Neuro-Fuzzy-Systemen für Anwendungsszenarien der Telemedizin*. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, 2006.
- [135] WALDMANN, P.; KAEMPCHEN, N.; ARDELT, M.; HOMM, F.: *Der Nothalteassistent – abgesichertes Anhalten bei plötzlicher Fahruntfähigkeit des Fahrzeugführers*. Tagungsband Ambient Assisted Living, Berlin, 2010.
- [136] WALLENTOWITZ, H.; EHMANN, D.; NEUNZIG, D.; WEILKES, M.: *Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, F 35, 2001.
- [137] WELFORD, A.T.: *Fundamentals of skill*. Methuen's manuals of modern psychology. Methuen, 1968.
- [138] WERLING, M.: *Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- [139] WESSEL, N.; ZIEHMANN, C.; KURTHS, J.; MEYERFELDT, U.; SCHIRDEWAN, A.; VOSS, A.: *Short-term forecasting of life-threatening cardiac arrhythmias based on symbolic dynamics and finite-time growth rates*. Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 61(1):733–739, 2000.
- [140] WEST, I.; NIELSEN, G.L.; GILMORE, A.E.; RYAN, J.R.: *Natural death at the wheel*. The Journal of the American Medical Association, 205(5):266–271, 1968.
- [141] WICKENS, C.D.: *Engineering Psychology and Human Performance*. HarperCollins Publishers Inc., New York, 1992.

- [142] WICKENS, C.D.; GOH, J.; HELLEBERG, J.; HORREY, W.J.; TALLEUR, D.A.: *Attentional Models of Multitask Pilot Performance Using Advanced Display Technology*. Human Factors, 45(3):360–380, 2003.
- [143] WICKENS, C.D.; HORREY, W.J.: *Models of Attention, Distraction, and Highway Hazard Avoidance*. In: REGAN, M.A; LEE, J.D.; YOUNG, K.L. (Herausgeber): *Driver Distraction*, Seiten 57–69. CRC Press, 2009.
- [144] WINNER, H.; WEITZEL, A.: *Quo vadis, FAS*. In: WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. (Herausgeber): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Seiten 664–673. Vieweg+Teubner Verlag, Berlin, 2012.
- [145] WINNER, H.; WOLF, G.; WEITZEL, A.: *Freigabefälle des Autonomen Fahrens*. Tagungsband der 15. VDI-Tagung: Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung, 2010.
- [146] WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Vieweg+Teubner Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2012.
- [147] YOUNG, S.L.; LOVVOLL, D.R.: *Intermediate processing stages: methodological considerations for research on warnings*. In: WOGALTER, M.S.: *Warnings and Risk Communication*, Seiten 23–34. Taylor & Francis, 1999.
- [148] ZAUNSEDER, S.: *Anwendungs- und prozessorientierte Verarbeitung elektrokardiographischer Langzeitaufnahmen zur Ischämiedetektion*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2011.

